

**CARACTERIZACION DINAMICA DE LOS SUELOS EN UN SECTOR DE LA VIA  
GIRON – BUCARAMANGA**

**JAIRO RAFAEL GAMBOA RAMIREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
MAESTRIA EN GEOTECNIA  
BUCARAMANGA  
2012**

**CARACTERIZACION DINAMICA DE LOS SUELOS EN UN SECTOR DE LA VIA  
GIRON – BUCARAMANGA**

**JAIRO RAFAEL GAMBOA RAMIREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Geotecnia**



**Director**

**VLADIMIIR MERCHAN JAIMES**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
MAESTRIA EN GEOTECNIA  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

*A mi familia*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A todos mis profesores, compañeros de maestría.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION.....	20
1. OBJETIVOS .....	22
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
2. NOCIONES DE SISMOLOGIA .....	23
2.1 TECTONICAS DE PLACAS.....	23
2.2 FALLAS GEOLOGICAS.....	24
2.2.1. Fallas normales: .....	24
2.2.2. Fallas inversas.....	25
2.2.3 Falla de transformación (de desgarre). .....	26
3. ONDAS.....	27
4. DINAMICA DE SUELOS.....	29
4.1 VIBRACIONES .....	29
4.2 VIBRACIÓN LIBRE.....	30
4.3 VIBRACIÓN FORZADA .....	32
4.4 VIBRACIÓN AMORTIGUADA.....	34
4.5 VIBRACIÓN FORZADA AMORTIGUADA.....	37
4.6 AMPLIFICACION SISMICA .....	38
4.7 EFECTO DE SITIO.....	39
4.8 RESPUESTA SÍSMICA DE LOS SUELOS .....	39
4.8.1 Propiedades dinámicas de los suelos .....	39

4.9 ESPECTRO DE FOURIER .....	40
4.10 REPRESENTACIÓN DE FOURIER.....	40
4.11 ESPECTROS RESPUESTA .....	41
5 LITIFICACION O DIAGENESIS .....	44
6. PROGRAMA QUAKE .....	47
6.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES- DATOS USADOS EN QUAKE .....	47
6.2 MODELOS A CONSTITUIR.....	50
6.2.1Modelo lineal elástico.....	50
6.2.2 Modelo lineal equivalente.....	50
6.2.3 Función de reducción de G .....	51
6.2.4 Función de relación de amortiguamiento .....	53
7. CARACTERIZACIÓN DINAMICA DE LOS SUELOS DE LA VIA GIRON – BUCARAMANGA.....	55
7.1 SECTOR DE ESTUDIO- .....	55
7.2 METODOLOGIA Y PLAN DE ENSAYOS.....	56
7.3 EXPLORACION GEOLÓGICA.....	57
7.3.1. Formación Bucaramanga.....	58
7.4. TOPOGRAFIA .....	63
7.5 TRABAJOS DE CAMPO Y ENSAYOS .....	65
7.5.1 Estudio Geoeléctrico:.....	66
7.5.1.1. Análisis de datos Geoeléctricos: .....	67
7.5.1.2. Interpretación de resultados.....	68
7.5.1.3 Observaciones sondeo eléctrico vertical sev – 1:.....	70
7.5.1.4. Conclusiones y recomendaciones (del estudio geofísico de resistividad):	70
7.5.2. Sondeos y ensayos.....	72
7.5.3 Ensayos Dinámicos .....	75
7.5.3.1. Triaxial cíclico: .....	75

7.5.3.2 Resultados e interpretación (del ensayo Triaxial):.....	77
7.3.2. Ensayo de velocidad de ondas – PUNDIT .....	83
7.5.4. Curva de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento. ....	91
7.5.5 Análisis de las curvas de degradación de módulo de corte y amortiguamiento obtenidas en las figuras 43.44.45 y 46.....	96
8. SISMOS DE ANALISIS.....	99
8.1 SISMO DE ARMENIA .....	99
8.2 SISMO DE JAPÓN .....	102
8.3 SISMO DE CALIFORNIA .....	104
8.4 SISMO DE CHINA.....	106
8.5 CONTENIDOS FRECUENCIALES .....	108
9. ANALISIS DINAMICO DEL PERFIL DEL SUELO.....	111
9.1 MODELAMIENTO EN QUAKE .....	111
9.2 ANALISIS LINEAL ELASTICO .....	112
9.2.1 Sismo de armenia (unidimensional) .....	114
9.2.2 Sismo de california (unidimensional).....	115
9.2.3 Sismo de china (unidimensional) .....	116
9.2.4 Sismo de Japón (unidimensional) .....	117
9.3 ANALISIS BIDIMENSIONAL - LINEAL ELÁSTICO.....	118
9.3.1 Sismo de Armenia (Bidimensional) .....	119
9.3.2 Sismo de california (Bidimensional) .....	120
9.3.3 Sismo de china (Bidimensional).....	121
9.3.4 Sismo del Japón (Bidimensional).....	122
9.4 ANALISIS LINEAL EQUIVALENTE.....	124
9.4.1Análisis bidimensional.....	124
9.5 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DINÁMICA (ESPECTROS DE RESPUESTA).....	133

10. ENSAYO DE CRISTALOGRAFIA (por difracción de rayos x) .....	136
11. CONCLUSIONES .....	141
12. RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFIA.....	146
ANEXOS .....	149

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Placas de la litosfera.....	24
Figura 2. Falla normal.....	25
Figura 3. Falla inversa.....	26
Figura 4. Falla de transformación.....	26
Figura 5. Principales tipos de ondas que se generan en un sismo.....	27
Figura 6. Diagrama de vibración libre de un grado de libertad.....	29
Figura 7. Diagrama de vibración amortiguada con dos grados de libertad.....	30
Figura 8. Gráfico de una vibración libre.....	31
Figura 9. Diagrama de vibración libre forzada de un grado de libertad.....	32
Figura 10. Factor de amplificación en función de la razón de frecuencias.....	33
Figura 11. Ejemplo de vibración forzada no amortiguada.....	34
Figura 12. Diagrama de vibración libre amortiguada de un grado de libertad.....	34
Figura 13. Ejemplo de vibración amortiguada con factor de amortiguación de 0.25.....	36
Figura 14. Ejemplo de vibración amortiguada con factor de amortiguación de 1..	36
Figura 15. Ejemplo de vibración amortiguada con factor de amortiguación de 2..	36
Figura 16. Diagrama de vibración forzada amortiguada de un grado de libertad.....	37
Figura 17. Factor de amplificación en función de la razón de frecuencias para distintos valores del factor de amortiguamiento.....	38
Figura 18. Ondas sinusoidales sumadas para obtener un pulso.....	41
Figura 19. Representación gráfica del espectro de respuesta de un acelerograma.....	42
Figura 20. Modelo de estructura de un grado de libertad sometida a sollicitación sísmica.....	42
Figura 21. Variación del Módulo G con la profundidad.....	49

Figura 22. Log G vs Log $\sigma'_m$ .....	49
Figura 23. Variación de G durante un terremoto. ....	51
Figura 24. Grafica de función de reducción de G. ....	52
Figura 25. Relación de amortiguamiento .....	54
Figura 26. Sector de estudio .....	55
Figura 27. Mapa de geología local .....	59
Figura 28. Topografía del sector .....	64
Figura 29. Perfil topográfico de análisis .....	65
Figura 30. Ubicación del sondeo de resistividad eléctrica .....	67
Figura 31. Grafica de Resistividad vs Profundidad .....	69
Figura 32. Foto del lugar en donde se ejecutó el SEV-1 .....	69
Figura 33. Registro fotográfico para ensayos.....	73
Figura 34. Registro fotográfico de tallado de las muestras.....	74
Figura 35. Ubicación de toma de muestras.....	75
Figura 36. Muestras usadas para el ensayo triaxial cíclico .....	76
Figura 37. Gráficas y registro fotográfico del ensayo. ....	78
Figura 38. Gráficas y registro fotográfico .....	79
Figura 39. Gráficas y registro fotográfico .....	80
Figura 40. Gráficas y registro fotográfico .....	81
Figura 41. Equipo utilizado para el ensayo y muestras a utilizar. ....	84
Figura 42. Valores de G para varios valores de v .....	89
Figura 43. Curvas de degradación del módulo cortante miembro órganos. ....	93
Figura 44. Curvas de degradación del módulo cortante par el miembro finos. ....	94
Figura 45. Curvas de degradación del módulo cortante para el miembro gravoso.....	95
Figura 46. Curvas de degradación del módulo cortante para el miembro de limos rojos.....	96
Figura 47. Curva Histerética del miembro limos rojos para el primer ciclo de carga. ....	97
Figura 48. Funcion de reducción de G y Amortiguación calculados en Quake.....	97

Figura 49. Datos de entrada para el programa QUAKE/W .....	99
Figura 50. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish .	101
Figura 51. Datos de entrada para el programa QUAKE/W .....	102
Figura 52. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish	103
Figura 53. Datos de entrada al programa QUAKE/W .....	104
Figura 54. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish .	105
Figura 55. Datos de entrada al programa QUAKE/W .....	106
Figura 56. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish .	107
Figura 57. Espectro de potencia de los sismos .....	108
Figura 58. Espectro de potencia de los sismos .....	109
Figura 59. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	114
Figura 60. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	115
Figura 61. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	116
Figura 62. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	117
Figura 63. Presiones efectivas en el terreno .....	118
Figura 64. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	119
Figura 65. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	120
Figura 66. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	121
Figura 67. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos .....	122
Figura 68. Analisis lineal - equivalente unidimensional .....	124
Figura 69. Perfil Bidimensional .....	125
Figura 70. Estado de presión de poros .....	125

Figura 71. Variación del módulo cortante.....	126
Figura 72. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos.....	127
Figura 73. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos.....	129
Figura 74. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos.....	130
Figura 75. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos.....	131
Figura 76. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos.....	132
Figura 77. Espectro respuesta de aceleraciones con sismo de Armenia .....	133
Figura 78. Espectro respuesta de aceleraciones sismo de california .....	133
Figura 79. Espectro respuesta de aceleraciones con sismo de Japón .....	134
Figura 80. Espectro respuesta de aceleraciones con sismo de China .....	134
Figura 81. Caracterización cristalográfica del miembro órganos .....	138
Figura 82. Caracterización cristalográfica miembros finos .....	139
Figura 83. Caracterización cristalográfica miembros gravoso .....	139

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Principales minerales de las rocas sedimentarias .....	46
Tabla 2. Resultados del ensayo de penetración estándar.....	73
Tabla 3. Esfuerzos efectivos .....	76
Tabla 4. Resultado del ensayo Triaxial cíclico en limos rojos.....	77
Tabla 5 Resultados del ensayo triaxial ciclico en suelo gravoso. ....	78
Tabla 6 .Resultados del ensayo traxial cíclico en suelo fino.....	79
Tabla 7. Resultados del ensayo triaxial cíclico en el miembro órganos.....	80
Tabla 8. Parámetros determinados con el ensayo .....	82
Tabla 9. Propiedades elásticas de un material.....	85
Tabla 10. Resultados del ensayo Pundit.....	85
Tabla 11. Valores de relación de Poisson .....	87
Tabla 12. Valores de relación de Poisson.....	87
Tabla 13. Resultados del ensayo de ultrasonido.....	89
Tabla 14. Valores obtenidos para Gmax con el recalculo de Poisson .....	90
Tabla 15. Datos de entrada para el programa QUAKE/W .....	90
Tabla 16. Propiedades del sismo.....	100
Tabla 17. Propiedades del sismo.....	102
Tabla 18. Propiedades del sismo.....	104
Tabla 19. Propiedades del sismo.....	106
Tabla 20. Contenidos frecuenciales de sismos de la falla romeral .....	109
Tabla 21. Contenidos frecuenciales de los sismos .....	110
Tabla 22. Valores de propiedades dinámicas usados en Quake.....	112
Tabla 23. Resultados del análisis lineal elástico (Unidimensional).....	113
Tabla 24. Resumen de resultados obtenidos de los sismos (lineal elástico bidimensional) Amortiguación 1%.....	123

Tabla 25. Resumen de resultados obtenidos de los sismos (lineal equivalente) 128	128
Tabla 26. Comparación de resultados .....	135
Tabla 27. Caracterización cristalográfica del miembro órganos .....	137
Tabla 28. Caracterización cristalográfica miembros finos .....	138
Tabla 29. Caracterización cristalográfica miembros gravoso .....	139

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A: DATOS DE TRIAXIAL CICLICO.....	150
ANEXO B. SISMOS (DATOS DE ACELEROGRAMAS) .....	155
ANEXO C. ESTUDIO GEOELECTRICO.....	158
ANEXO D: REPORTE ORIGINAL DE QUAKE PARA EL ANÁLISIS LINEAL- ELÁSTICO Y LINEAL EQUIVALENTE.....	159

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACION DINAMICA DE LOS SUELOS EN UN SECTOR DE LA VIA GIRON – BUCARAMANGA\*

**AUTOR:** JAIRO RAFAEL GAMBOA RAMIREZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Modulo cortante, amortiguación, modelo lineal elástico, modelo lineal equivalente, Espectro de respuesta.

### DESCRIPCION

La caracterización dinámica de un suelo consiste en determinar sus propiedades de rigidez, representada por el módulo cortante  $G$ , y la disipación de energía o amortiguación  $\epsilon$ . Estas son fundamentales en la determinación de la respuesta del suelo al someterse a la acción de un sismo. El sector de la vía Bucaramanga – Girón, está constituido por los cuatro miembros de la formación Bucaramanga, para cada uno de los miembros se determinaron valores de módulo cortante y amortiguación a partir de ensayos triaxiales dinámicos y se calcularon valores de  $G_{\max}$ , con base en resultados de velocidad de onda ( $P$ ), determinadas por ultrasonido con relaciones de Poisson ( $\nu$ ) de 0.45 y 0.49.

RESULTADOS	$\sigma_3$ (Kpa)	$G_{prom}$ KPa	$\xi_{prom}$ %	$V_p$ (m/seg)	**Poisson $\nu$	$G_{max}$ (Kpa)
Miembro Órganos	22.6	29.490	8.9	1132	0.49	463,106
Miembro Finos	52	54.825	7.2	1269	0.49	606,749
Miembro Gravoso	20.6	13.610	7.3	726	0.49	180,049
Miembro Limos Rojos	20.6	38.210	6.7	1172	0.49	443,603

Se tuvieron en cuenta cuatro sismos con contenidos frecuenciales variables, de Armenia, California, China y Japón.

Con los resultados obtenidos de triaxial y los valores máximos de  $G$ , según una relación de Poisson de 0.49 y un análisis lineal-equivalente evaluado en el programa Quake, se encontró que la respuesta del suelo dio una deamplificación entre 6% y 25% (espectro respuesta), equivalentes entre 0.11g y 0.17g, para un valor de amortiguación de 1%.

Contrario a esto, en un modelo lineal-elástico, considerando el módulo cortante  $G$  constante e igual al promedio encontrado con los ensayos triaxiales, una amortiguación del 1%, se encontró que se presentan amplificaciones entre 96 y 230% (espectro respuesta), para los sismos de Armenia, California y China, equivalentes a 0.23g y 0.6g. Para el sismo del Japón se deamplifica un 40% dando un valor de aceleración espectral de 0.13g.

El valor máximo de aceleración de referencia en todos los sismos es 0.25g.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Maestría en Geotecnia  
Director: Vladimir Merchan Jaimes

## ABSTRACT

**TITLE:** DYNAMIC CHARACTERIZATION OF SOILS IN A SECTOR OF THE GIRON – BUCARAMANGA ROAD\*

**AUTHOR:** JAIRO RAFAEL GAMBOA RAMIREZ\*\*

**KEYWORDS:** shear modulus, damping, linear elastic model, equivalent linear model, response spectrum.

### DESCRIPTION

The dynamic characterization of a soil consists of determining properties of rigidity, represented by G cutting module, and the dissipation of energy or damping  $\varepsilon$ . These are fundamental in determining the response of soil to undergo the action of an earthquake. The section of Bucaramanga – Giron road, is constituted by four members Bucaramanga's formation, to each member were determined values of cutting module and damping from dynamic by Triaxial tests and calculated values of Gmax, based on results of (P) wave speed, determined by ultrasound with ratio of Poisson ( $\nu$ ) of 0.45 and 0.49.

RESULTS	$\sigma'_3$ (Kpa)	Gprom KPa	$\xi$ prom %	Vp (m/seg)	**Poisson u	Gmax (Kpa)
Miembro Órganos	22.6	29.490	8.9	1132	0.49	463,106
Miembro Finos	52	54.825	7.2	1269	0.49	606,749
Miembro Gravoso	20.6	13.610	7.3	726	0.49	180,049
Miembro Limos Rojos	20.6	38.210	6.7	1172	0.49	443,603

In order to develop the research was taking into account four earthquakes with contents of variable frequency, of Armenia, California, China and Japan.

With the results of triaxial and the maximum values of G, according to a ratio of Poisson 0.49 and evaluated lineal-equivalente analysis in the Quake program, found that the response of the soil gave a decrease of aceleration between 6% and 25% (response spectrum), equivalent between 0.11 g and 0. 17 g, for a value of 1% damping.

Contrary to this, in a lineal-elastico model, whereas the cutting module G constant and equal to the average found with Triaxial tests, a 1% damping, found amplifications between 96 and 230% (response spectrum), for the earthquakes of Armenia, California and China, equivalent to 0.23 presents g and 0. 6 g. For the Japan earthquake the aceleration decrease 40%, giving a value of spectral acceleration of 0. 13 g.

The maximum acceleration of reference in all the earthquakes is 0. 25 g.

---

\* Project of grade

\*\* Physicochemical engineering faculty, school of Civil Engineering, masters in Geotechnics  
Director: Vladimir Merchan Jaimes

## INTRODUCCION

Durante los últimos años se han presentado una diversidad de movimientos sísmicos alrededor de las zonas de subducción, que nos recuerdan el hecho de que nuestro país se encuentra en una zona altamente sísmica.

Esta ubicación de nuestro país y los sismos de Armenia y Chile, han requerido que buena parte de la sociedad se prepare para estudiar en mejor detalle las actividades sísmicas y su efecto sobre los emplazamientos de nuestras construcciones en ciudades con alto grado de vulnerabilidad.

Como resultado de esta preocupación, se ha renovado el código de construcción sísmoresistente a partir del año 2010; y adicionalmente, se han dedicado más horas de estudio por parte de las universidades a mejorar el conocimiento en sismología.

Es así que se establece un problema por solucionar, el conocimiento de las propiedades dinámicas locales de las ciudades para adaptar soluciones de ingeniería a los requisitos demandados por los sismos y el suelo.

En este trabajo se pretende encontrar esas propiedades o características dinámicas de un perfil de suelo ubicado en la ciudad de Bucaramanga.

Se inicia este trabajo con un recuento general de nociones de sismología, ondas, vibraciones, efectos de sitio (amplificación), litificación y estado del arte, seguido, de la evaluación de propiedades de las estructuras del suelo, en especial la estimación de las variables: Velocidad de ondas primarias ( $V_p$ ), Velocidad de ondas secundarias ( $V_s$ ), Módulo de Corte, ( $G$ ), Relación de amortiguamiento ( $\varepsilon$ ),

Densidad ( $\rho$ ), Relación de Poisson ( $\nu$ ), Espesores. Composición mineralógica del suelo

Se continua con la definición de un modelo de perfil unidimensional y bidimensional, que incluya las condiciones de sitio, y el establecimiento de varios sismos asociados a varios acelerogramas, los cuales en conjunto se analizan mediante el Programa QUAKE, de Geostudio, el que arrojará un sinnúmero de respuestas, entre las que están los espectros de respuesta, los acelerogramas en superficie y los estados de esfuerzos en ese perfil; necesarios estos para la modelación y análisis de estructuras sismoresistentes.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar las características dinámicas de los suelos de un sector de Bucaramanga y su respuesta a la acción de varios sismos.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una caracterización de las propiedades dinámicas del depósito del suelo en estudio.
- Establecer sismos de diseño para estudiar la respuesta sísmica del depósito de suelo en consideración.
- Estudiar la influencia de las propiedades dinámicas y el efecto de la topografía en la respuesta del suelo.
- Interpretar los resultados obtenidos a la luz de las implicaciones prácticas en la ingeniería sismo resistente.

## **2. NOCIONES DE SISMOLOGIA**

Los terremotos son vibraciones de la corteza terrestre producidas por una rápida liberación de energía. La energía liberada se propaga en forma de ondas desde el punto de origen del terremoto denominado foco o hipocentro. La proyección del foco sobre la superficie de la tierra se llama epicentro. Las vibraciones se producen como consecuencia del comportamiento elástico de las rocas al ser sometidas a esfuerzos cíclicos, generados generalmente debido al deslizamiento de la corteza terrestre a lo largo de una falla.

Las placas de la corteza terrestre interactúan entre sí, creando tensión y deformando las rocas en sus bordes donde se produce la mayor parte de los terremotos.

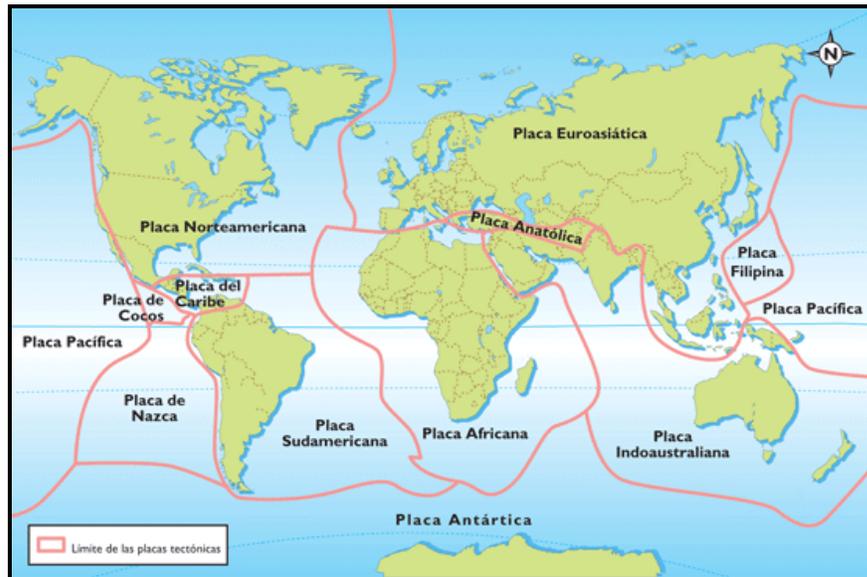
### **2.1 TECTONICAS DE PLACAS**

La corteza terrestre, se divide en corteza oceánica y corteza continental.

La corteza y parte del manto superior forman una capa relativamente fría y rígida, denominada litosfera. A una profundidad de unos 660 kilómetros se encuentra una capa blanda y plástica, conocida con el nombre de astenosfera

El movimiento de la corteza terrestre a lo largo de millones de años ha modificado la superficie de la tierra y el fondo de los océanos, formando cadenas montañosas y dorsales submarinas. La teoría que modela y explica estos fenómenos se denomina tectónica de placas.

**Figura 1. Placas de la litosfera**



**Fuente:** [http://mx.kalipedia.com/geografia-mexico/tema/mexico/tectonica-placas.html?x=20080507klpgeogmx\\_14](http://mx.kalipedia.com/geografia-mexico/tema/mexico/tectonica-placas.html?x=20080507klpgeogmx_14).Kes

## 2.2 FALLAS GEOLOGICAS

Es una grieta en la litosfera. Generalmente, las fallas están asociadas con los límites entre las placas tectónicas de la Tierra. Hay otras fallas al interior de las placas que son locales. En una falla activa, las piezas de la corteza de la Tierra a lo largo de la falla, se mueven con el transcurrir del tiempo. El movimiento de estas rocas puede causar terremotos. El tipo de movimiento a lo largo de una falla depende del tipo de falla.

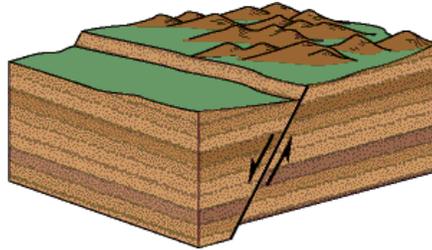
### 2.2.1. Fallas normales:

Las fallas normales se producen cuando las áreas en contacto se están separando (un ejemplo es la dorsal oceánica), de manera que la corteza rocosa de un área específica es capaz de ocupar más espacio.

En general las rocas de un lado de la falla normal se desplazan hacia abajo con respecto a las rocas del otro lado de la falla.

Las fallas normales contrario de las fallas inversas no crean salientes rocosos.

**Figura 2. Falla normal**



**Fuente:** <http://www.windows2universe.org/earth/geology>.

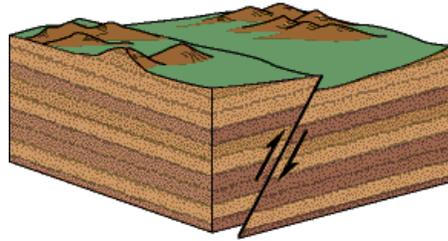
### **2.2.2. Fallas inversas.**

Las fallas inversas o de reversa ocurren en áreas donde las rocas se comprimen unas contra otras (fuerzas de compresión), de manera que se producen cadenas de montañas, un ejemplo de ello son los Andes suramericanos.

En una falla inversa, el área expuesta de la falla es frecuentemente un saliente. De manera que no se puede caminar sobre ella.

Fallas de empuje son un tipo especial de falla inversa. Ocurren cuando el ángulo de la falla es muy pequeño.

**Figura 3. Falla inversa**



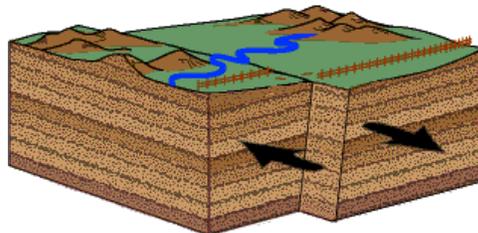
**Fuente:** <http://www.windows2universe.org/earth/geology>

### **2.2.3 Falla de transformación (de desgarre).**

El movimiento a lo largo de la grieta de la falla es horizontal, el bloque de roca a un lado de la falla se mueve en una dirección mientras que el bloque de roca del lado opuesto de la falla se mueve en dirección opuesta.

Las fallas de desgarre no dan origen a caídas o escarpes porque los bloques de uno y otro lado de la falla se mueven en sentido contrario sobre el plano horizontal, un ejemplo de estas fallas es la de San Andrés en California.

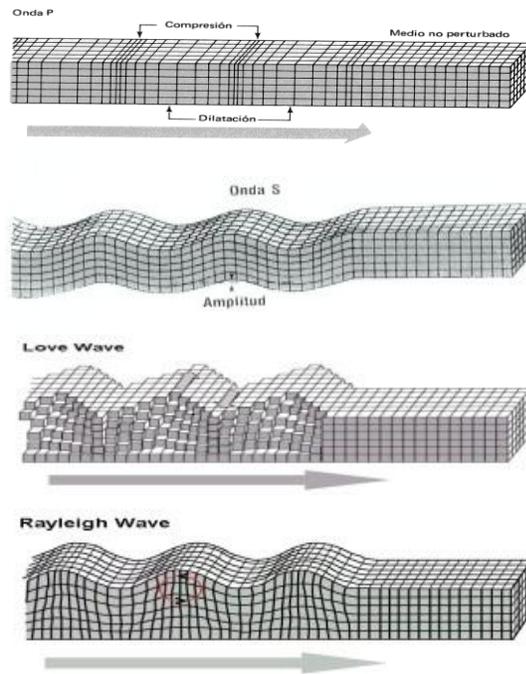
**Figura 4. Falla de transformación**



**Fuente:** <http://www.windows2universe.org/earth/geology>

### 3. ONDAS

Figura 5. Principales tipos de ondas que se generan en un sismo.



Fuente: <http://ingcivilperu.blogspot.com/2011/02/nociones-de-sismologia-guia-de-estudio.html>

Existen dos tipos principales de ondas sísmicas denominadas internas y ondas superficiales. A su vez, se distinguen dos tipos de ondas internas, las primarias o de compresión P que hacen vibrar una partícula en el sentido de propagación de las ondas, comprimiendo y dilatando alternativamente el medio sólido a través del cual viajan; también se les denomina ondas longitudinales. Por otro lado, están las ondas secundarias o de corte S, que hacen vibrar la partícula en sentido perpendicular a las trayectorias de las ondas, éstas producen esfuerzos de corte en el medio en que se propagan; se denominan, también, ondas transversales.

Las ondas superficiales se dividen en ondas Love (Lq) y ondas Rayleigh (LR); el movimiento de las ondas lo que hace vibrar la partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación, sin movimiento vertical. El movimiento de las ondas Rayleigh se dá sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas con movimiento elíptico.

## 4. DINAMICA DE SUELOS

### 4.1 VIBRACIONES

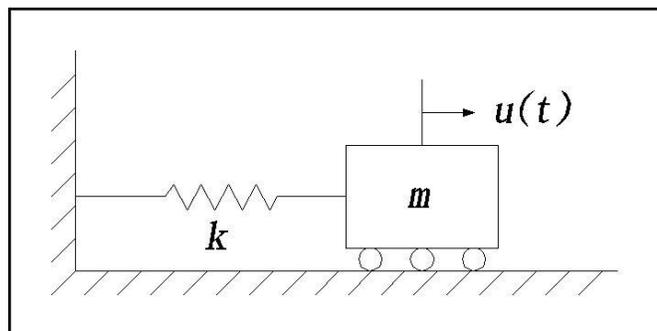
Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo o en posición de equilibrio.

Cuando un sistema elástico es desplazado de una posición de equilibrio, se genera una vibración debido a la acción de fuerzas recuperadoras.

La vibración es la causa de generación de todo tipo de ondas

En un medio normal se pueden presentar varios casos de vibraciones que sirven para comprender el comportamiento dinámico del suelo. Se inicia conociendo el comportamiento de vibraciones libres

**Figura 6. Diagrama de vibración libre de un grado de libertad**

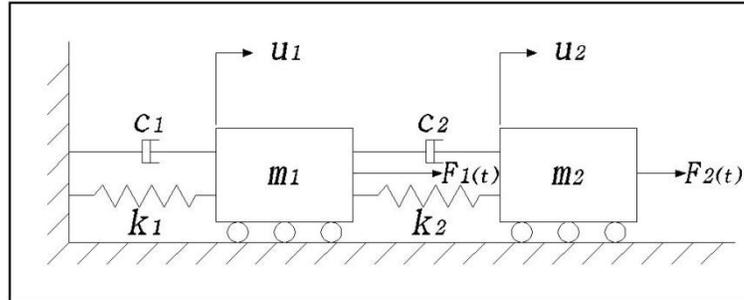


Fuente: Autor.

Un objeto en vibración libre solo se ve afectado por la acción de las fuerzas recuperadoras, pero en la práctica los sistemas de ondas se amortiguan y pueden

llegar a ser complejos sistemas de varios grados de libertad como el de la siguiente figura.

**Figura 7. Diagrama de vibración amortiguada con dos grados de libertad**



Fuente: Autor

La modelación de un sistema es la tarea más importante del análisis dinámico

## 4.2 VIBRACIÓN LIBRE

En un sistema de vibración libre de 1 grado de libertad el movimiento se encuentra regido por la siguiente ecuación.

$$m\ddot{u} + k u = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $m$ , es la masa del cuerpo.  
 $K$ , es la constante del resorte.  
 $\ddot{u}$ , es la componente de aceleración.  
 $u$ , es la componente de desplazamiento.

Del movimiento armónico simple se tiene

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \text{ Ecuación 3}$$

La solución a la ecuación del movimiento (1) de vibración es:

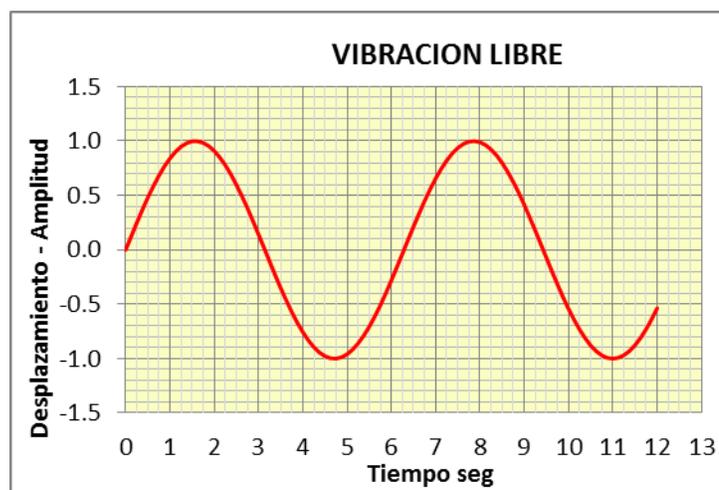
$$u(t) = U_m \cdot \text{Sen}(\omega \cdot t + \delta) \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:  $U_m$ = amplitud máxima  
 $U(t)$ = amplitud a cualquier tiempo  
 $\omega$ = velocidad angular  
 $t$ = tiempo  
 $\delta$ = amplitud de desfase

Nos permite conocer la variación de la amplitud en función del tiempo.

La forma como se desarrollaría el movimiento de vibración libre (no se tiene en cuenta fricciones por rozamiento con el aire ni con el suelo), se muestra en la siguiente gráfica.

**Figura 8. Gráfico de una vibración libre**

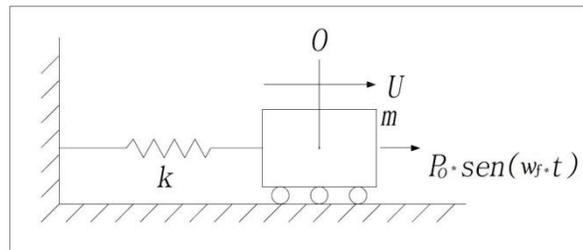


Fuente: Autor

### 4.3 VIBRACIÓN FORZADA

En caso de vibraciones de un grado de libertad forzado se aplica una fuerza  $P_o(t)$ , con cierta frecuencia,  $w_f$ .

**Figura 9. Diagrama de vibración libre forzada de un grado de libertad**



Fuente: Autor

$$P_t = P_o * \text{sen}(\omega_f * t) \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

$P_o$  = Fuerza cíclica aplicada

$\omega_f$ : Frecuencia de aplicación de la fuerza,

La ecuación de movimiento teniendo en cuenta la fuerza

$$m\ddot{u} + ku = P_o \cdot \text{sen}(\omega_f * t) \quad \text{Ecuación 6}$$

La solución a la ecuación 2 de equilibrio está dada por:

$$U_m = \frac{\frac{P_o}{k}}{1 - (\omega_f/\omega_n)^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Y nos permite conocer la amplitud máxima en función de la relación entre las frecuencias y la fuerza externa aplicada.

$$\frac{U_m}{\frac{P_0}{k}} = \frac{1}{1-(w_f/w_n)^2} \quad \text{Ecuacion 8}$$

La relación  $U_m/(P_0/k)$ , se denomina Factor de amplificación.

Definiendo  $r = w_f/w_n$ , razón de frecuencias; otra solución a la ecuación 2, nos permite encontrar la ecuación de movimiento de las vibraciones forzadas no amortiguadas en función del tiempo:

$$U(t) = \frac{P_0/k}{1-r^2} * \sin w_f * t - r * \sin(w_n * t) \quad \text{Ecuación 9}$$

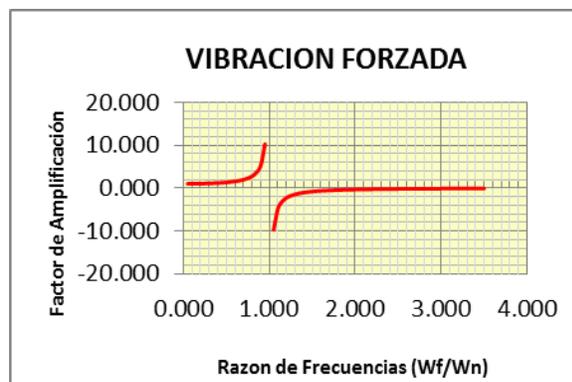
Si  $r=1$  existe resonancia.

Las siguientes gráficas son ejemplo de vibraciones con relación de frecuencias diferentes

$w_f/w_n=0.95$  casi en resonancia, Factor de amplificación=10.25

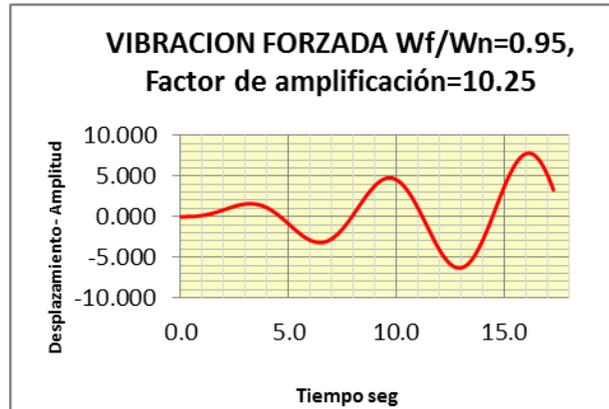
La gráfica superior nos muestra el factor de amplificación en función de la relación de frecuencias.

**Figura 10. Factor de amplificación en función de la razón de frecuencias.**



Fuente: Autor

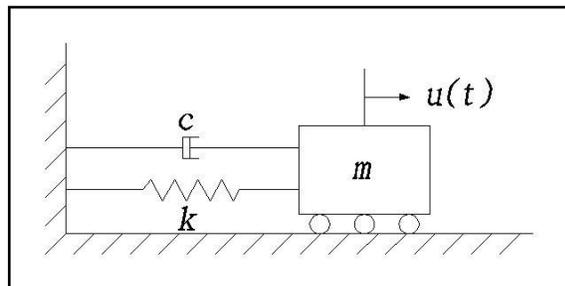
**Figura 11. Ejemplo de vibración forzada no amortiguada.**



**Fuente:** Autor

#### 4.4 VIBRACIÓN AMORTIGUADA

**Figura 12. Diagrama de vibración libre amortiguada de un grado de libertad**



**Fuente:** Autor.

La ecuación que rige este movimiento está dado por

$$m\ddot{u} + k u + c \dot{u} = 0 \text{ Ecuación 10}$$

La solución a la ecuación 10 del movimiento de vibraciones libres amortiguadas, está dada por la ecuación

$$U_t: U_m * e^{-\frac{c}{2m} * t} * \text{sen}(\omega_d * t + \delta) \quad \text{Ecuacion 11}$$

$\omega_d$ : frecuencia angular de vibración amortiguada

C: coeficiente de amortiguamiento

Cuando el exponente  $c/2m$ , es igual a 1, se presenta amortiguamiento crítico, donde:

$$C_c = 2 * m * \omega_n$$

$C_c$ : amortiguamiento crítico

$\omega_n$ : frecuencia natural del sistema

El valor  $C/C_c$ : se conoce como factor de amortiguamiento

Según los valores de C y  $C_c$ , se distinguen tres casos de amortiguamiento.

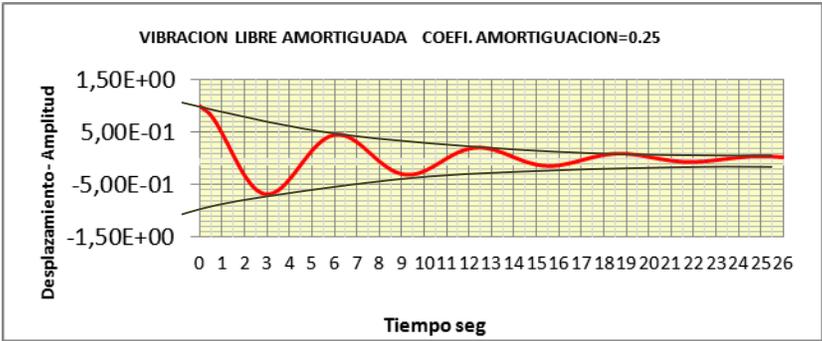
Amortiguamiento fuerte o supercrítico, donde  $C > C_c$ , la recuperación del sistema es rápida y no se presenta vibración

Amortiguamiento crítico,  $C = C_c$ , la recuperación del sistema es rápida y no se presenta vibración.

Amortiguamiento subcrítico,  $C < C_c$ , para este caso, el amortiguamiento se presenta disminuyendo gradualmente la amplitud del movimiento.

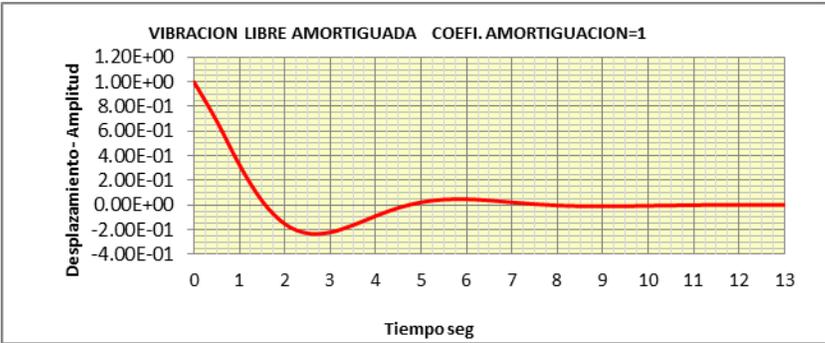
Las siguientes gráficas son un ejemplo de la forma como se presentan las vibraciones a lo largo del tiempo para diferentes casos de amortiguamiento.

**Figura 13. Ejemplo de vibración amortiguada con factor de amortiguación de 0.25**



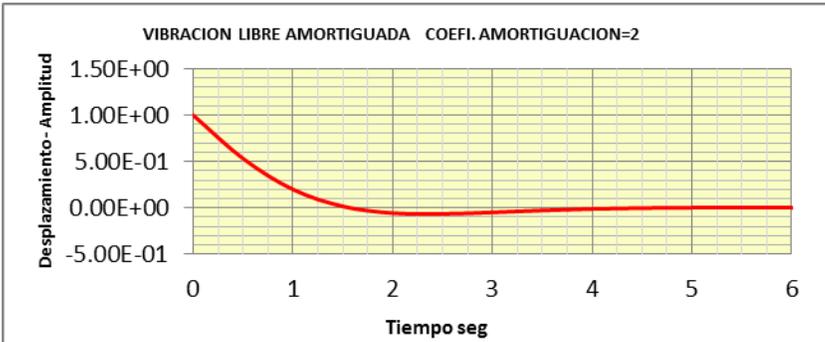
Fuente: Autor

**Figura 14. Ejemplo de vibración amortiguada con factor de amortiguación de 1**



Fuente: Autor

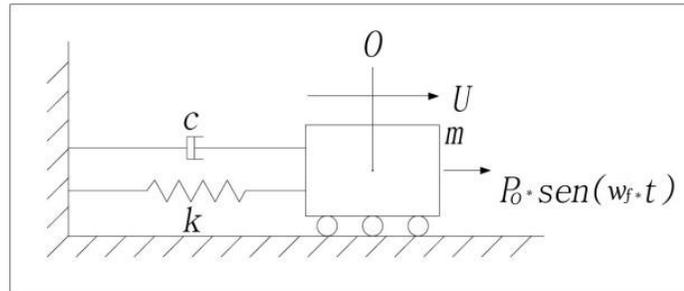
**Figura 15. Ejemplo de vibración amortiguada con factor de amortiguación de 2**



Fuente: Autor

#### 4.5 VIBRACIÓN FORZADA AMORTIGUADA

Figura 16. Diagrama de vibración forzada amortiguada de un grado de libertad



Fuente: autor

La ecuación que rige este movimiento viene definida por:

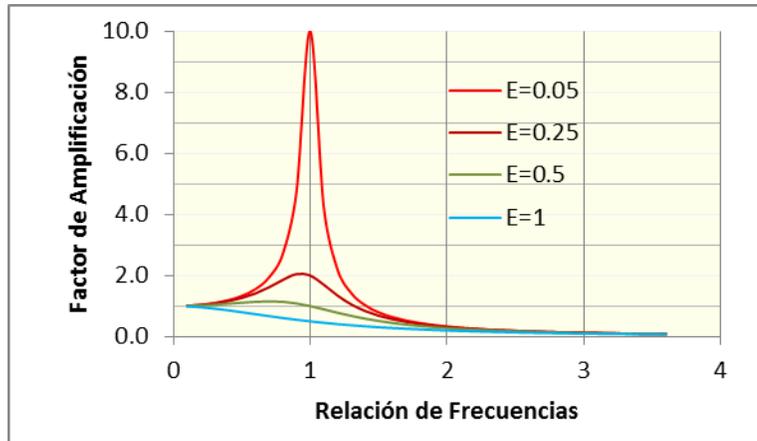
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P_0 \text{Sen } w_f * t + \delta \dots\dots\dots\text{Ecuación 12}$$

La solución a la ecuación nos proporciona la variación de la relación de amplitudes o factor de amplificación en función de la relación de frecuencias.

$$\frac{U_m}{P_0/k} = \frac{1}{(1-(\omega_f/\omega_n)^2)^2 + (2(C/C_c)(\omega_f/\omega_n))^2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 13}$$

Con el fin de interpretar los resultados de la fórmula, se grafican a continuación la variación de relación de frecuencias, versus factor de amplificación para diversos valores de factor de amortiguamiento.

**Figura 17. Factor de amplificación en función de la razón de frecuencias para distintos valores del factor de amortiguamiento.**



Fuente: Autor.

#### 4.6 AMPLIFICACION SISMICA

En la actualidad, es bien conocido que las características dinámicas de un suelo, y la topografía del sector son las variables locales más importantes en la determinación de los parámetros sísmicos de diseño.

Los daños ocasionados por sismos de gran magnitud, aunque estos ocurran cerca, son variables, y dependen fundamentalmente del tipo de suelo y la topografía del terreno.

Este fenómeno, donde las ondas que llegan al suelo desde un basamento rocoso y que producen amplificación local de las ondas sísmicas, está asociado principalmente a las propiedades geotécnicas del subsuelo y la profundidad de este hasta el basamento rocoso, se suele denominar “efecto de sitio” o simplemente “amplificación de suelos”.

## **4.7 EFECTO DE SITIO<sup>1</sup>**

“El efecto de sitio consiste en la amplificación de las ondas sísmicas, así como una mayor duración de la misma y la variación de su contenido de frecuencia. Así, frente a un movimiento sísmico las capas de suelo actúan como filtros de frecuencias, de manera que modifican la energía que transmiten a la estructura.

Se ha observado, que los depósitos de suelo amplifican el movimiento o señal de entrada cuando las frecuencias predominantes son bajas (periodos altos), mientras que los suelos rígidos lo hacen con señales cuyas frecuencias predominantes son altas (periodos bajos).”

## **4.8 RESPUESTA SÍSMICA DE LOS SUELOS**

### **4.8.1 Propiedades dinámicas de los suelos<sup>2</sup>**

“La amplificación del movimiento en el suelo está determinada por sus propiedades dinámicas.

Las propiedades dinámicas más importantes a tener en cuenta en la caracterización dinámica de suelos están constituidas por la rigidez y el amortiguamiento. Estas dos propiedades son fundamentales para la determinación de la respuesta del suelo al someterse a la acción de un sismo. El módulo de resistencia al cortante  $G$ , es un buen representante del valor de la rigidez del suelo, el cual se calcula por medio de la velocidad de las ondas transversales; de

---

<sup>1</sup>Influencia De La Amplificación Local De Las Ondas Sísmicas y La Interacción Suelo-Fundación En El Puente Marga-Marga, Tania Alejandra Trigo Salas, Universidad de Chile, 2007. Pág. 12.

<sup>2</sup> IBID., Pág. 12

otro lado, la razón de amortiguamiento,  $\xi$ , representa la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía.

Otras propiedades, que aunque no son tan importantes son fundamentales para la determinación de las propiedades de rigidez y amortiguamiento, son la densidad,  $\rho$ , la relación de Poisson,  $\nu$ , el índice de plasticidad, la presión de confinamiento, la presión porosa, la relación de vacíos y la diagénesis o historia de conformación del suelo.”

#### **4.9 ESPECTRO DE FOURIER**

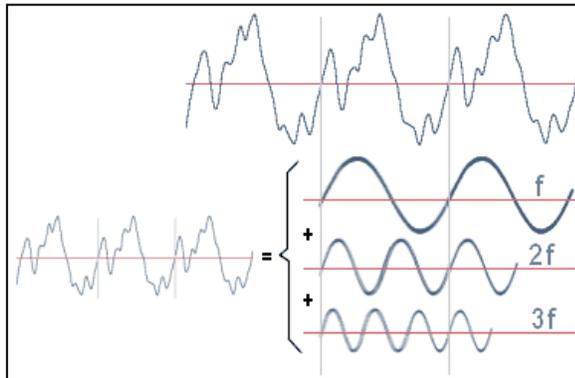
El espectro de Fourier, es un parámetro que nos proporciona un amplio conocimiento acerca de cuál es el contenido en frecuencias del acelerograma, de modo que para cada periodo de oscilación del acelerograma se representa la amplitud máxima que le corresponde.

Del análisis del espectro de Fourier, podemos deducir cuales son los periodos más importantes del terremoto, que son los que lo van a caracterizar. En el espectro de Fourier se pueden encontrar los valores predominantes de frecuencia o período. Se dibuja con ejes logarítmicos, de modo que en el eje de abscisas se colocan los distintos periodos de oscilación, y en el eje de ordenadas se representan las amplitudes de aceleración, velocidad o desplazamiento.

#### **4.10 REPRESENTACIÓN DE FOURIER.**

El espectro de Fourier se puede entender mejor cuando sumamos varias vibraciones sinusoidales, de diferentes amplitudes y periodos. El resultado de esta combinación es un pulso con el que muestra la figura.

**Figura 18. Ondas sinusoidales sumadas para obtener un pulso.**



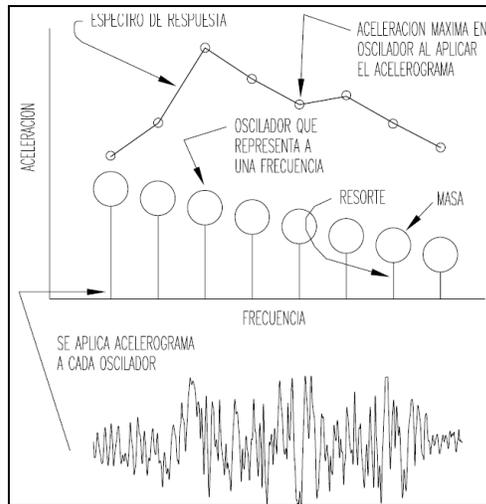
Fuente: <http://cpms-acusticamusical.blogspot.com/2009/10/analisis-armonico-el-teorema-de-fourier.html>

De esta manera podemos construir una onda de cualquier forma, mediante la suma (a veces infinita) de ondas sinusoidales con diferentes amplitudes y frecuencias (teorema de Fourier). La amplitud de cada onda sinusoidal componente nos indica qué tanto de ella contiene la onda sísmica en cuestión. Se llama “*espectro*” de la señal sísmica al conjunto de sus componentes sinusoidales.

#### **4.11 ESPECTROS RESPUESTA**

El concepto de espectro de respuesta sísmica, fue utilizado por 1º vez por M.A.Biot en 1932 como una forma práctica de caracterizar el movimiento del suelo y sus efectos sobre las estructuras. El espectro de respuesta de un acelerograma, representa la respuesta máxima de un oscilador de un solo grado de libertad y de masa unitaria, con frecuencia  $\omega_0$  y amortiguamiento  $\xi$ , cuando se le somete a un movimiento del suelo dado por dicho acelerograma.

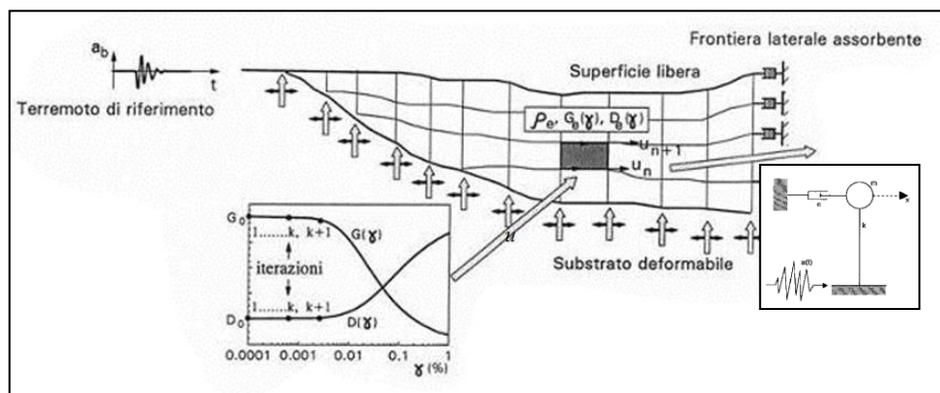
**Figura 19. Representación gráfica del espectro de respuesta de un acelerograma**



Fuente: Dinafacil

La masa de suelo es considerada una estructura a la que también se le aplica el concepto de oscilador de un grado de libertad, en el que sus fronteras se encuentran amortiguadas.

**Figura 20. Modelo de estructura de un grado de libertad sometida a sollicitación sísmica.**



Fuente: Soil dynamics and site response analysis, Prof. Francesco Silvestri

Se suelen considerar distintos periodos propios del oscilador y distintos valores de amortiguamiento, de modo que para un periodo propio  $T$  y un amortiguamiento  $\varepsilon$  del oscilador, el acelerograma provoca un movimiento cuyos picos de aceleración, velocidad y desplazamiento se recogen en el espectro de respuesta.

## 5 LITIFICACION O DIAGENESIS<sup>3</sup>

“Es el proceso en el tiempo mediante el cual un suelo sedimentario débil o suelto se transforma en una roca sedimentaria fuerte, inducida por la presión del suelo, con un aumento de la temperatura interna de este. La litificación se refiere a los cambios que tienen lugar después de la deposición obteniendo como resultado un incremento notable en la resistencia, conocido como consolidación.

Los principales procesos de la litificación son:

**CEMENTACION:** Consiste en el relleno de los vacíos del suelo depositado por un material cementante. El cual ha sido transportado internamente por aguas de infiltración subterránea.

La roca resultante tendrá una resistencia dependiente del tipo de cementante. La cementación es el proceso dominante en las rocas areniscas, debido a que en su estructura interna los vacíos son más grandes.

**RECRISTALIZACION:** Este proceso consiste en la solución y re deposición de minerales, por lo tanto algunos granos llegan a ser más pequeños y otros más grandes. El resultado es similar a la cementación pero puede producir una textura de mosaico. Puede también incluir cambios en el estado y crecimiento de nuevos y más estables minerales. Este proceso es dominante en las rocas limolitas.

---

<sup>3</sup> WALTHAM Tony. Foundation of engineering geology. 2009 P9

**COMPACTACIÓN:** Restructuración y cambio en la acomodación de los granos, con decremento en volumen, debido a la presión del suelo consecuencia de la reducción en la porosidad, en la medida en que el agua es desplazada hacia afuera. El incremento de la resistencia es debido a que hay mas contacto entre los granos del suelo. Este es el proceso dominante en las arcillas.

**CONSOLIDACION:** Generalmente se refiere al incremento de la resistencia de las arcillas, debido a su restructuración, reacomodamiento, pérdida de agua y reducción de la porosidad causada por la compacidad bajo cargas; estas también incluyen cementación y creación de nuevos minerales. Arcillas normalmente consolidadas nunca han estado sometidas a más altas cargas de las que existen sobre ellas. Arcillas sobre consolidadas han sido sometidas a altas cargas en el pasado, impuestas por cobertura de rocas que fueron removidas por la erosión; estas incluyen arcillas cercanas o dentro de secuencias de roca. Ellas tienen baja porosidad y muy alta resistencia debido a su historia de presión y exposición.”

El siguiente cuadro, describe los cristales predominantes en las formaciones de rocas sedimentarias y su escala de dureza.

**Tabla 1. Principales minerales de las rocas sedimentarias**

PRINCIPALES MINERALES DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS						
Mineral	Composición	Color		Dureza	Densidad	Morfología común y características
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Claro		7	2.7	granular; sin diaclasas; lustre vidrioso
Muscovita	KAl <sub>2</sub> AlSi <sub>5</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Claro		2 1/2	2.8	hojas delgadas y hojuelas en perfecto diaclasado, mica
Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	blanco				tipo estable; incluyendo arcilla china. Tipo dominante; similar a la muscovita fina. Inestable (con variación de agua); montmorillonita
Illita	KAl <sub>4</sub> AlSi <sub>7</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>	blanco				
Smectita	(Na,Ca)Al <sub>4</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> n H <sub>2</sub> O	blanco				
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	blanco		3	2.70	mosaico; restos de conchas; rónicas diaclasas en 3 planos
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	blanco		3 1/2	2.80	mosaico y rombos
Yeso	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	blanco		2	2.30	paletas de selenita; alabastro masivo; fibras satinadas
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	rojo		6	5.10	agente de color extendido
Limonita	FeO. OH	marrón		5	3.60	agente de color extendido; rustico; puede ser amarillo
Pyrita	FeS <sub>2</sub>	amarillo		6	5.00	pulimento abrasivo metálico (oro de los tontos); formas cúbicas

**Fuente:** Foundations of Engineering geology, Tony Waltham, 2009

Esto es indicativo de la calidad de los mantos sedimentarios para propósitos ingenieriles.

## 6. PROGRAMA QUAKE <sup>4</sup>

“QUAKE/W es una poderosa herramienta computacional de la empresa GEO-SLOPE internacional Ltd. QUAKE/W, es un software geotécnico que usa elementos finitos para el análisis dinámico de estructuras de tierra sometidas al movimiento de un sismo y otras cargas de impacto súbitas como por ejemplo, hincados de pilotes o explosiones.”

### 6.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES- DATOS USADOS EN QUAKE

Como se dijo anteriormente las principales propiedades que el programa requiere para hacer un análisis dinámico están relacionadas con la rigidez del suelo y la capacidad para dispar o amortiguar energía.

Los dos parámetros se relacionan uno con otro a través de algunos algoritmos estudiados recientemente por autores como Romo, Ishibashi y Zhang, Otalvaro, y otros.

Las propiedades de rigidez, caracterizada por el módulo cortante  $G$  y el factor de amortiguamiento no son constantes, son variables, y gran parte de su variación es producida por la misma acción del sismo. En el primero se presenta una degradación paulatina con el incremento de la deformación angular y la amortiguación se incrementa con el reacomodamiento.

---

<sup>4</sup> KRAHN John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An engineering methodology. 2004 P 71

En el programa Quake también son importantes los parámetros de presión de poros y su variación con los movimientos cíclicos y los parámetros de relación de esfuerzo cíclico para la evaluación de posibilidad de licuefacción.

El parámetro de la rigidez del suelo puede ser constante para un suelo en particular, y esta puede ser definida con el valor del módulo de corte  $G$ , o el valor de  $E$  (módulo de Young de elasticidad).

La relación de Poisson es también un parámetro necesario, por defecto esta relación es 0.33. Sin embargo QUAKE/W hace un recalcu y asume un valor de relación de Poisson de 0.49.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$E = 2(1+\nu)G \quad \text{Ecuación 15}$$

Si no es conocido el valor de  $G$ , se puede introducir el valor de  $E$ . Quake, recalcu estos valores a partir de la relación de Poisson y las relaciones mencionadas arriba.

La relación de amortiguación también puede ser especificada como una constante. QUAKE/W usa el amortiguamiento constante especificado, si no se define una función de amortiguamiento. Si la función de amortiguamiento es definida y especificada la relación de amortiguamiento constante es ignorada.

En el caso de que se conozca la variación de  $G$  con la profundidad, es posible introducir dentro del programa esta función, que define un incremento del módulo cortante con base en la ecuación 16.

$$G = KG (\sigma'_m)^N \text{ Ecuación 16}$$

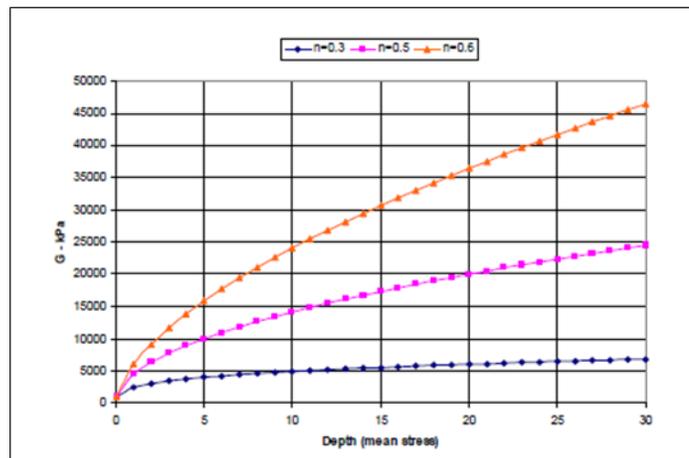
KG = Número de modulo

$\sigma'_m$  = Esfuerzo efectivo principal  $\sigma'_y + \sigma_x + \sigma'_z / 3$

N = exponente

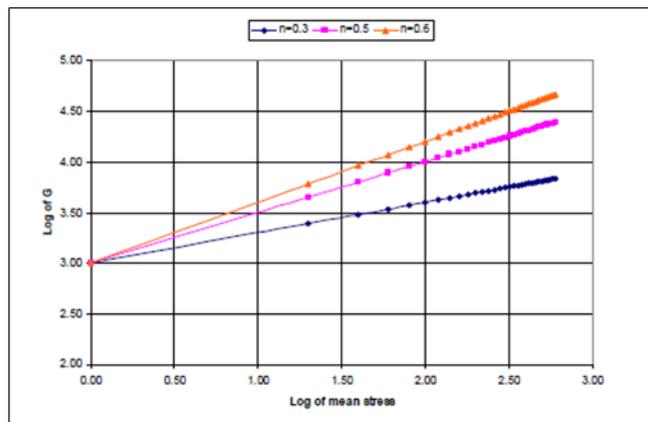
Para los análisis dinámicos de QUAKE/W los esfuerzos principales  $\sigma'_m$  provienen de un análisis de esfuerzos inicial del sitio.

**Figura 21. Variación del Módulo G con la profundidad**



Fuente: Imágenes de Dynamic Modeling with QUAKE/W

**Figura 22. Log G vs Log  $\sigma'_m$**



Fuente: Imágenes de Dynamic Modeling with QUAKE/W.

## 6.2 MODELOS A CONSTITUIR

El programa Quake funciona con dos tipos de modelación relaciones esfuerzo-deformación. Uno es el modelo simple lineal-elástico y el otro es conocido como modelo lineal-equivalente.

Modelo lineal- elástico es el modelo más sencillo. Es donde los esfuerzos están directamente proporcionales a la deformación y la constante de proporcionalidad es el módulo de Young  $E$ . Esta ecuación es de la forma  $\sigma = E \varepsilon$  esta es una relación lineal y no relaciona la resistencia del material.

### 6.2.1 Modelo lineal elástico.

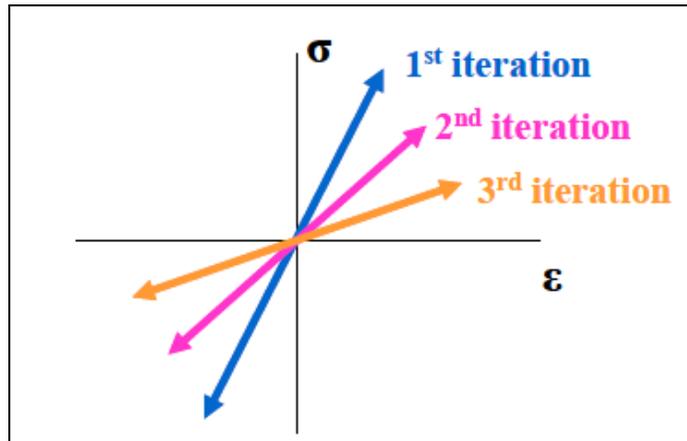
Con este método se supone que la relación esfuerzo-deformación es constante y lineal. Este modelo se aleja un poco de la realidad y proporciona resultados conservadores, por lo cual es para aprender, probar y verificar algunos propósitos desde que no haya problemas de convergencia.

### 6.2.2 Modelo lineal equivalente.

El modelo lineal equivalente es muy similar al modelo lineal elástico; la diferencia es que la rigidez del suelo ( $E$  o  $G$ ) es modificada en respuesta a los cálculos de deformaciones.

Con este modelo QUAKE/W inicia el análisis dinámico con un valor especificado de  $G$ . QUAKE/W pasa a través de los datos registrados del sismo e identifica la deformación para el cortante máximo de cada punto de integración numérica de gauss en cada elemento. El modulo cortante  $G$ , es entonces modificado de acuerdo con una específica función de reducción de  $G$  y el proceso se repite hasta alcanzar un valor especificado de tolerancia llamada convergencia

**Figura 23. Variación de G durante un terremoto.**



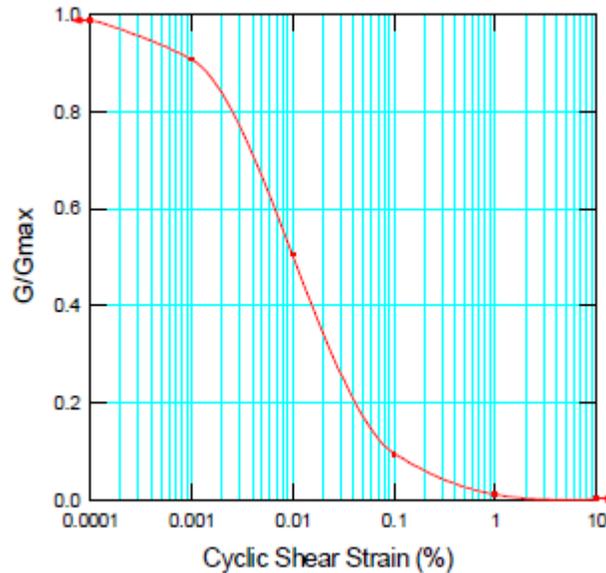
Fuente: Imágenes de Dynamic Modeling with QUAKE/W.

### 6.2.3 Función de reducción de G

En el sometimiento a esfuerzos cíclicos de un suelo, la resistencia al cortante de esta se ve disminuida con cada ciclo de aplicación de carga, esta reducción suele expresarse como relación del valor máximo de la resistencia, que para este caso es  $G_{max.}$ , tal como se ilustra en la siguiente. Esto es llamado función de reducción G. Las deformaciones por cortante cíclico vienen de análisis de elementos finitos. El cálculo de la deformación cortante conjuntamente con la función del valor de  $G_{max}$  es usado para calcular el nuevo valor de G para cada iteración.

El valor de  $G_{m\acute{a}x}$  en Quake es un valor establecido por el usuario o calculado de los esfuerzos iniciales.

Figura 24. Grafica de función de reducción de G.



Fuente: Imágenes .de Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Ishibashi y Zhang (1993) desarrollaron una experiencia para determinar  $G/G_{max}$ . Los dos principales variables son PI (Índice de plasticidad) y presión de confinamiento.

Como sigue de la siguiente manera:

$$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0}$$

<sup>5</sup> Ecuación 17

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000102 + n(PI)^{0.492}}{\gamma} \right) \right] \right\}$$

Ecuación 18

<sup>5</sup> KRAMER, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. Editorial Prentice – Hall. 1996. Pag.237

$$m(\gamma, PI) - m_o = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3})$$

$$n(PI) = 0.00 \quad \text{for } PI = 0$$

$$n(PI) = 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} \quad \text{for } 0 < PI < 15$$

$$n(PI) = 7.00 \times 10^{-7} PI^{1.976} \quad \text{for } 15 < PI < 70$$

$$n(PI) = 2.70 \times 10^{-5} PI^{1.115} \quad \text{for } PI > 70$$

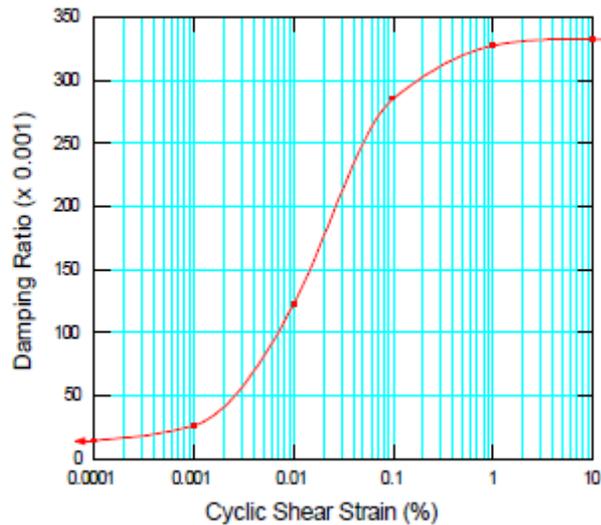
Ecuación 19

Las unidades son en kPa. Con estas ecuaciones empíricas, los rangos de valores de deformación angular, el valor de índice de plasticidad y el esfuerzo de confinamiento, se puede calcular  $G/G_{max}$  y establecer una función de reducción de  $G$ .

#### 6.2.4 Función de relación de amortiguamiento

QUAKE/W permite definir el amortiguamiento de un suelo con una función de datos, la relación de amortiguamiento es usada en la ecuación de movimiento de elementos finitos.

**Figura 25. Relación de amortiguamiento**



**Fuente:** Imágenes de Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Una típica función de relación de amortiguamiento es afectada por la deformación angular por cortante cíclico.

De acuerdo con Ishibashi y Zhang 1993, la expresión es:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.3})}{2} \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right]$$

Ecuación 20

La relación  $G/G_{\max}$  se calcula como se dijo en la sección anterior, la relación de amortiguamiento es entonces calculado para el mismo índice de plasticidad en un rango asumido de deformaciones angulares por cortante cíclico. El cálculo de datos es usado para desarrollar la función de relación de amortiguamiento.

## 7. CARACTERIZACIÓN DINAMICA DE LOS SUELOS DE LA VIA GIRON – BUCARAMANGA.

### 7.1 SECTOR DE ESTUDIO-

El sector en estudio, está ubicado sobre los suelos de la parte occidental de Bucaramanga, exactamente entre la transversal metropolitana y la autopista Bucaramanga – Girón. Fue escogido porque sobre estos terrenos se están empezando a construir viviendas de interés social y se proyecta como un sector de expansión urbana, en el que es posible contribuir presentando este análisis de caracterización dinámica para futuros proyectos.

**Figura 26. Sector de estudio**



Fuente: Google Earth

## 7.2 METODOLOGIA Y PLAN DE ENSAYOS.

De acuerdo con lo estudiado, los datos más importante que se necesitan para la caracterización dinámica de un perfil de suelo son los valores de las propiedades dinámicas de cada uno de los suelos constitutivos del perfil, específicamente los valores de Módulo de Corte,  $G$ , el módulo de Young,  $E$ , la relación de amortiguamiento, la relación de Poisson,  $\mu$ , y las velocidades de onda  $V_p$  y  $V_s$ ; por otro lado se deben conocer las condiciones de los esfuerzos de confinamiento y nivel de aguas freáticas. Obviamente se deben conocer los demás parámetros que caracterizan el material como son la densidad,  $\rho$ , el índice de plasticidad,  $IP$ , que afectan directamente los valores de los módulos y la resistencia al corte del terreno.

Hemos visto que conocidos estos valores, QUAKE/W, ya puede realizar un análisis dinámico de un perfil de suelo. La complejidad y exactitud del análisis dependerá de que tan acertados sean los datos de los valores incluidos dentro del sistema.

En el capítulo que tratamos el tema de QUAKE/W, se dan las suficientes explicaciones de cómo se deben incluir los valores dependiendo de la exactitud de estos; por ejemplo, en QUAKE/W se puede incluir el valor de  $G$  como una constante o como una función. En este trabajo lo incluiremos como una función.

La metodología seguida es la siguiente:

- a) Se realizaron trabajos de campo y de laboratorio con el fin de encontrar la morfología y propiedades dinámicas del suelo.

Para tal fin se realizaron las siguientes actividades:

- Exploración geológica
  - Realización de Topografía.
  - Ensayos de campo
    - Ensayos de resistividad eléctrica (Geoeléctrica).
    - Ensayos de penetración estándar SPT
  - Ensayos de Laboratorio
    - Clasificación
    - Triaxial dinámico
    - Ensayo Pundit, para determinación de Velocidades de onda.
    - Ensayo de difracción de rayos X
- b) Se realiza una descripción geológica de la zona.
- c) Se procesan los resultados con el fin de establecer el perfil de suelo que se ajusta a la composición real del terreno.
- d) Se definen los valores y funciones necesarias de las propiedades del terreno para introducir dentro del programa QUAKE/W.
- e) Se establecen los sismos que se usaran para definir el modelo dinámico.
- f) Se corre el programa QUAKE/W con el fin de obtener los espectros de respuesta y de diseño, y los esfuerzos efectivos al final de la sacudida.
- g) Se dan conclusiones.

### **7.3 EXPLORACION GEOLÓGICA**

La ciudad de Bucaramanga, en su totalidad se encuentra ubicada sobre la Formación Bucaramanga, que a su vez está constituida por cuatro miembros o grupos de suelo.

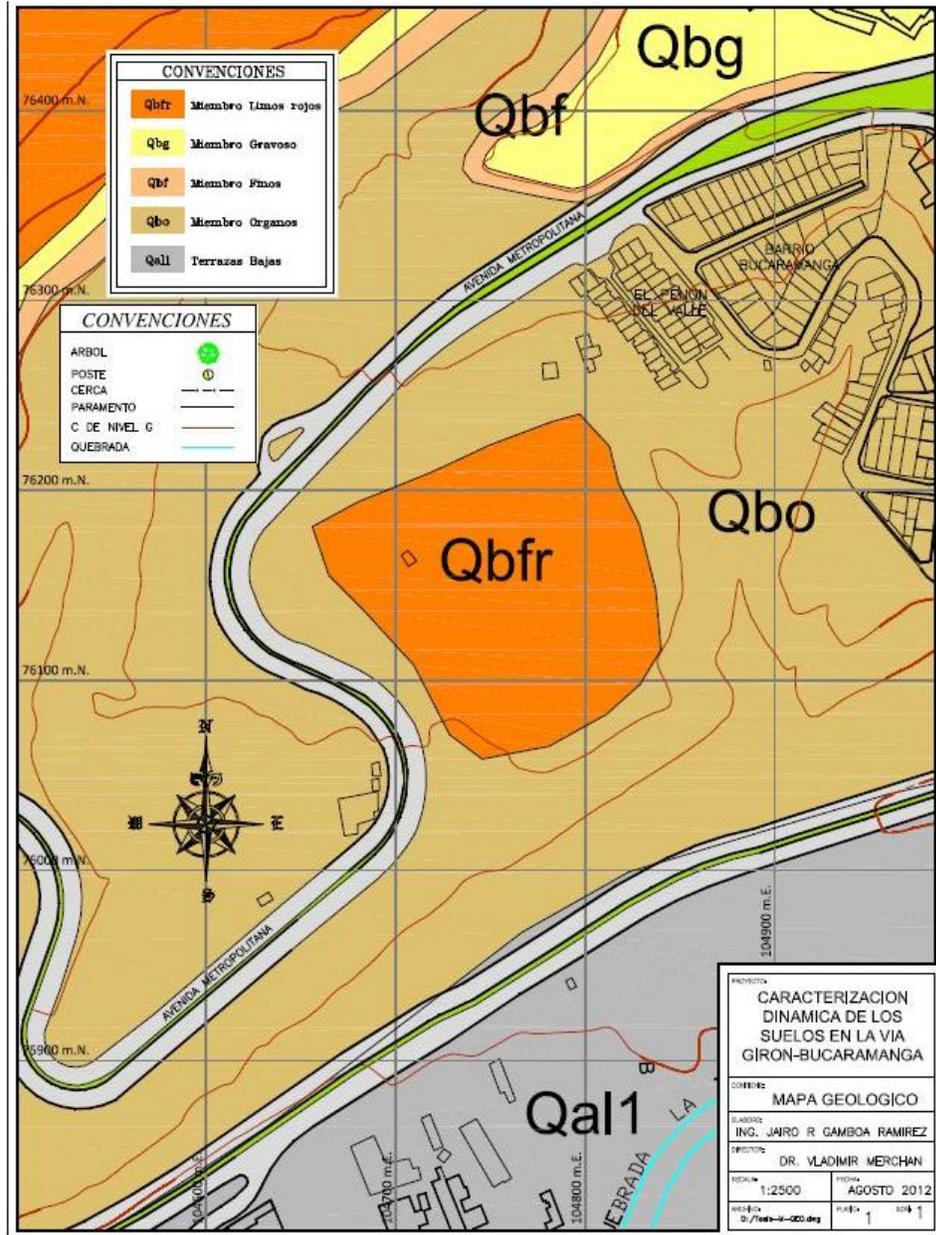
### 7.3.1. Formación Bucaramanga<sup>6</sup>

“La formación Bucaramanga fue descrita inicialmente por De Porta (1958). Se trata de un importante sedimentario de edad Cuaternaria que morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado, posiblemente asociado en su mayor parte al río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el cerro de Palo negro y el río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Presenta una superficie suavemente ondulada, con pendiente ligeramente inclinada al occidente entre 2 y 7, y una extensión aproximada de 60 a 80 km. La formación Bucaramanga es disectada por varias quebradas, la mayoría afluentes del río de oro, conformado un drenaje dendrítico subparalelo”.

---

<sup>6</sup> INGEOMINAS. Zonificación Sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Bogotá. 2001. Pag. 19

Figura 27. Mapa de geología local.



Fuente: Tomado del estudio indicativo sismogeotécnico de Bucaramanga

El espesor del depósito aumenta de oriente a occidente. En este estudio se presenta una aproximación de la profundidad del basamento rocoso, ubicado a 170 metros de la superficie.

“De acuerdo con la granulometría, morfología, agentes de transporte y fuentes de los materiales, esta unidad se acumuló en un ambiente típicamente fluvial, donde alternan materiales de origen aluvial tipo cono de eyección, flujos de escombros canal y lagunar.”

De acuerdo a los últimos estudios geológicos sobre la formación Bucaramanga, esta se encuentra compuesta por cuatro miembros, de inferior a superior; el miembro órganos (Qbo), el miembro fino (Qbf), el miembro gravoso (Qbg), y el miembro limos rojos (Qblr),

**Miembro órgano (Qbo):**

Aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental de la meseta de Bucaramanga y el Área Metropolitana, en los alrededores del municipio de Girón, anillo vial, en las estribaciones de la parte norte de la mesa de Ruitoque y en los cortes de la carretera que comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga.

Con base en las columnas realizadas, correlaciones estratigráficas y cortes topográficos, se estima que su espesor podría superar los 180m, siendo el nivel más potente de la formación Bucaramanga (Mancera y Salamanca, 1994). Morfológicamente este miembro constituye valles en “V”, interfluvios de filos ondulados con crestas agudas ramificadas. Se caracteriza por erosionarse fácilmente, formando surcos, cárcavas, y tierras malas que quedan en formas de estoraques que alcanzan alrededor de 15 metros de altura donde se desarrolla un drenaje dendrítico subparalelo.

**Miembros finos (Qbf):**

Se ubica estratigráficamente entre el nivel inferior de la Formación Bucaramanga (Miembro Órganos), y el nivel superior (Miembro Gravoso), en contactos netos planos paralelos. Es una extensa capa lenticular horizontal, más o menos

continua, de unos 15 metros de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limo arenosos, y arena limosos, de colores gris verdoso. Los mejores afloramientos se encuentran en las canteras de la antigua ladrillera Bucaramanga y en la empresa de ladrillos y tubos donde es explotada para la producción de ladrillos y tejas. Otros sectores donde aflora son los barrios Ciudadela Real de Minas, Campo Hermoso y la Feria entre otros.

La geometría de sus niveles es tabular a lenticular, con espesores que oscilan entre 5 y 40 cm, de estratificación plana paralela, cruzada y ondulosa.

La secuencia del Miembro Fino se puede dividir en dos conjuntos: 1) Conjunto Arcilloso: localizado hacia la base se caracteriza por ser Arcillo-Limoso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela en donde el espesor varia ampliamente, como en el barrio el Porvenir( 9 m), y cuchilla de Palomitas (2 m). 2) Conjunto Arenoso: se localiza hacia el techo donde muestra una alternancia Arena limosos, con niveles Limo arenosos, Arcósicos, de colores amarillento a pardo amarillento. Hacia la base de este conjunto predominan costas y un nivel arcilloso pardo oscuro. En la cuchilla Palomita solo se observan las Arcillas grises a verdes en contacto erosivo con suprayacente Miembro Gravoso (Qbg).

#### **Miembro gravoso (Qbg):**

Ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga, también conforma los escarpes superiores de la parte alta de nacimiento de la quebrada la iglesia, en los alrededores de los barrios lagos del Cacique, Diamante II y San Luis, otras secciones importante se localizan en los barrios la Cumbre, La Feria, Polvorines, Don Bosco y la vía a Café Madrid.

La morfología que presenta el Miembro Gravoso es similar a la del Órganos en los sectores del os valles de las quebradas, pero hacia la parte sur de la quebrada la

iglesia la morfología corresponde a colinas suaves onduladas, con un drenaje dendrítico.

Su espesor varía entre 8 y 30 m; presenta niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos. Los cantos son, en su mayor parte, tamaño grava de diámetro promedio de 15 cm y bloques de roca, en menor cantidad, hasta de 0.8 m de diámetro, subangulares a subredondeados, en matriz areno-arcillo-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido; en general el depósito es matriz soportado, aunque localmente se presenta clastos soportados. El contacto inferior con el miembro Finos es neto, continuo y suavemente ondulado y el contacto superior con el miembro Limos Rojos es gradacional (Niño y Vargas 1992).

Macroscópicamente se estima que la matriz representa alrededor de un 60% del volumen total, con aproximadamente una 2/3 partes de arena tamaño medio a grueso y 1/3 de finos. Los cantos están compuestos en su mayor parte por rocas metamórficas ígneas del Macizo de Santander, y areniscas cuarzosas, areniscas limosas y lomolitas moradas de la Formaciones Girón y Jordán. La matriz, por su parte es de composición cuarzo-feldespática micácea (cuarzo, plagioclasas, láminas de muscovita), de consistencia media y de baja cohesión.

#### **Miembro limos rojos (Qblr):**

Este miembro se localiza en el sector urbanizado de Bucaramanga, aunque no en forma uniforme y se continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca.

Geomorfológicamente este miembro constituyen lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, con relieve semiplano y pendientes entre 2y 7 %; el drenaje es escaso paralelo y superficial (Niño y Vargas, 1992). Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Se observó la presencia esporádica de bloques angulares

de arenisca asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Supra yace al segmento gravoso y su contacto con este es gradacional.

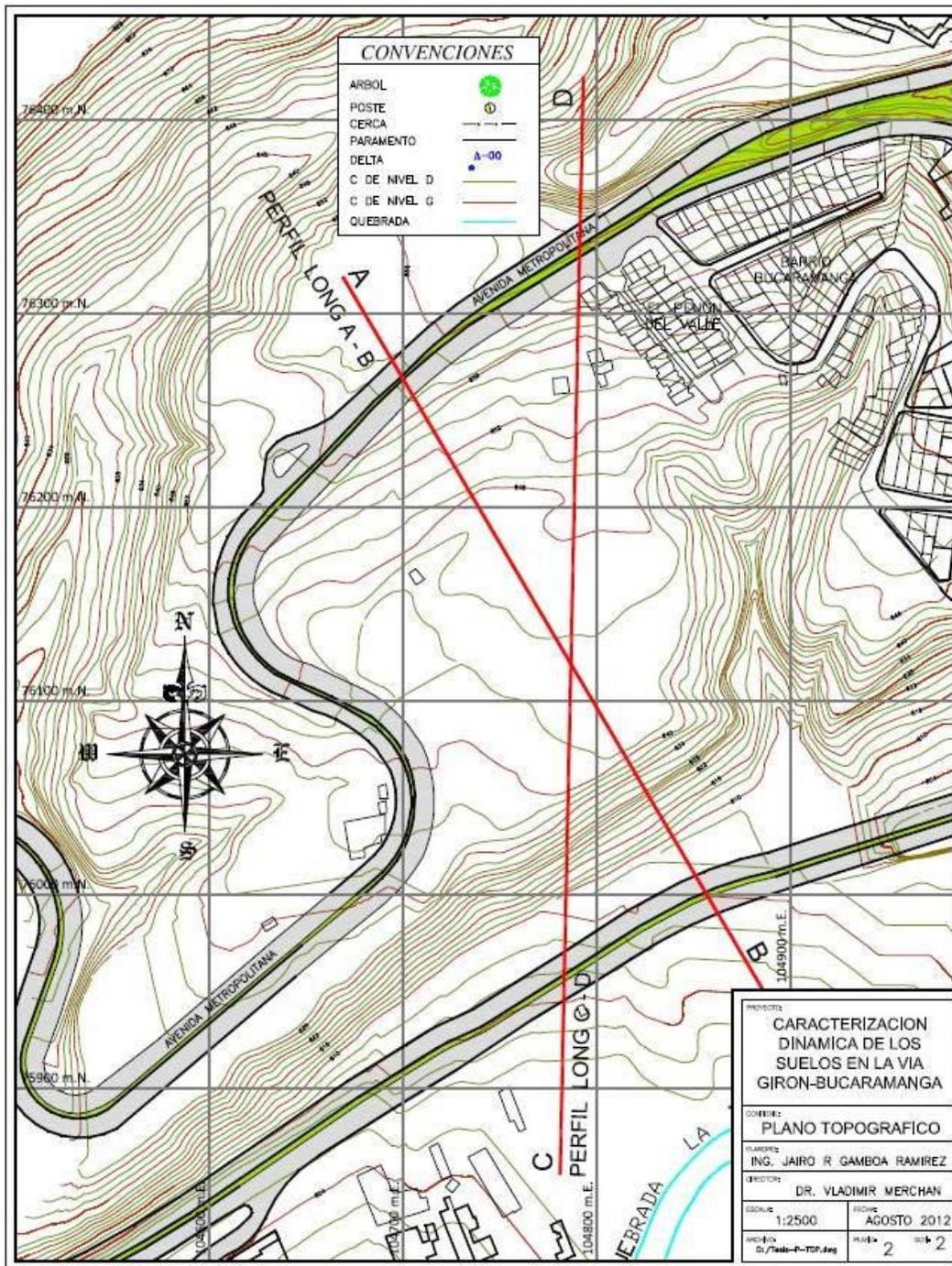
#### **7.4. TOPOGRAFIA**

El análisis dinámico considerando los efectos del sitio de un sector en particular se entienden contemplados incluyendo la topografía, pues el programa distribuye la malla de elementos finitos dentro de la topografía del terreno.

Con el fin de poder incluir los efectos morfológicos del sitio en los análisis dinámicos, se realizó una topografía detallada de todo el sector, de la cual se extrajo el perfil que se analizara en Quake/w.

La topografía del terreno muestra un sector predominantemente plano y otro con pendientes suaves a fuertes.

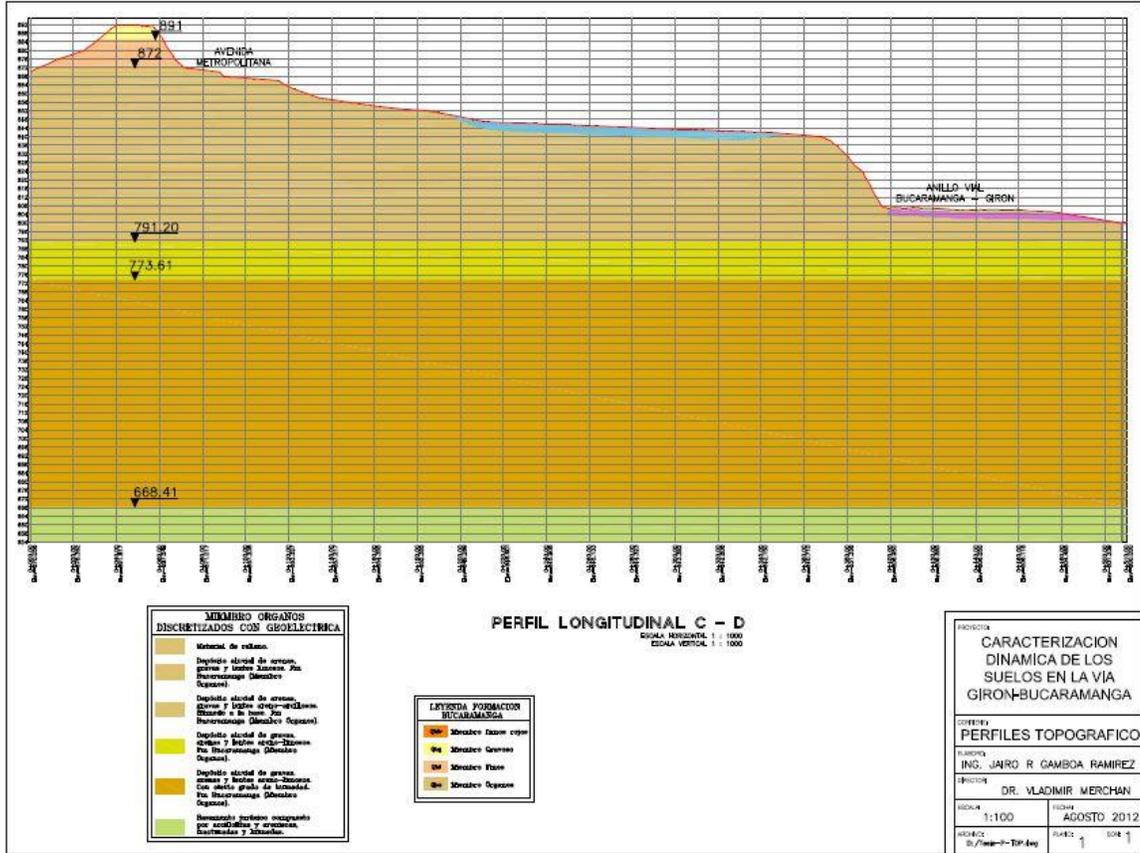
Figura 28. Topografía del sector



Fuente: Autor

El Perfil que se incluirán en Quake/w es el siguiente.

Figura 29. Perfil topográfico de análisis



Fuente: Autor

## 7.5 TRABAJOS DE CAMPO Y ENSAYOS

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, presentamos a continuación los resultados del ensayo de resistividad eléctrica realizado en un sector de la zona en estudio.

### **7.5.1 Estudio Geoeléctrico:**

Para la ejecución del Estudio Geoeléctrico se efectuaron cuatro (4) fases o etapas de trabajo que incluyeron las siguientes actividades:

1. Fase de Reconocimiento Lito-Estratigráfico y Estructural: Realizada en los alrededores del área del proyecto, con el fin de reconocer la geología local, estratigrafía, geomorfología, inclinación (actitud) de las capas de roca en superficie y constatar e identificar los principales agentes hídricos.
2. Fase de Adquisición de Datos: Efectuada con la visita puntual en los sitios de interés geotécnico para planear la ubicación y ejecución de un (1) Sondeo Eléctrico Vertical SEV (ver Figura 3) en el sector de la vía Bucaramanga-Girón, con una profundidad de investigación Geofísica de 177.80 m.
3. Fase de Valoración de Información: Revisión bibliográfica y análisis de la Información geológica existente de superficie y subsuelo, para el sector del estudio.
4. Fase de Procesamiento e Interpretación: Con los datos adquiridos de las fases anteriores y utilizando software, se realizó el procesamiento e interpretación de los datos y se correlacionaron los resultados con la información regional y local.

Los sondeos se realizan con un equipo de resistividad GESS-2000 compuesto por un Trasmisor y un Receptor con las siguientes características: Potencia 1500 W, Máximo Voltaje de Salida 400V, AB/2 Máxima de 1000 m de profundidad, Electrodo en Acero Inoxidable de Alta Conductividad, Corriente de salida: continua DC, Precisión en la corriente de salida 0.5% en 100mA, Tiempo de pulsación de 1 a 4 segundos, Lecturas en auto-rango, Precisión V/I de 0.1%,

Impedancia de entrada 1 M mínimo, Fuente de entrada 12V, Operación de temperaturas entre -5 a +50°C.

**Figura 30. Ubicación del sondeo de resistividad eléctrica**



Fuente: Google Earth

#### **7.5.1.1. Análisis de datos Geoeléctricos:**

En interpretaciones cuantitativas se debe distinguir entre interpretaciones puramente matemáticas e interpretaciones Hidrogeológicas. Es decir, la interpretación de un levantamiento Geoeléctrico es mucho más que simplemente sumar los resultados de una interpretación matemática de cada una de las mediciones.

Una interpretación Geoeléctrica tiene además como objetivo proporcionar información, como:

- Profundidades, espesores y extensión de acuíferos
- Capas semipermeables e impermeables.
- Nivel freático
- Profundidad del basamento
- Interfaz entre aguas dulces y saladas
- Calidad química de las aguas subterráneas
- Propiedades físicas de la roca (Porosidad, permeabilidad, granulometría, etc.)

En general, aporta datos sobre constitución hidrogeológica en un área.

En la interpretación de un Sondeo Eléctrico Vertical las resistividades aparentes, obtenidas por medio de un SEV con el dispositivo Schlumberger, se representan en función de las distancias  $AB/2$  en un gráfico de papel doblemente logarítmico, en el cual las ordenadas representan profundidades y las abscisas resistividad aparente (ver figura 5).

El sistema computarizado recibe las aperturas y la resistividad aparente, lo cual permite interpretar las unidades geoeléctricas con resistividad, espesor y profundidad del techo, para que manualmente se determine la litología correspondiente. Los anteriores datos son incluidos en otro programa de computador, denominado Curteo, en el cual se procede, independientemente del programa inicial, en forma totalmente inversa, obteniendo así la curva teórica, la cual indica el grado de confiabilidad de los datos obtenidos en el campo.

Para ambos casos se emplea un error relativo de 0,10, lo cual muestra la precisión con la cual se maneja la información a ser comparada.

#### **7.5.1.2. Interpretación de resultados**

Localización: separador vía Bucaramanga-Girón (figura 6).

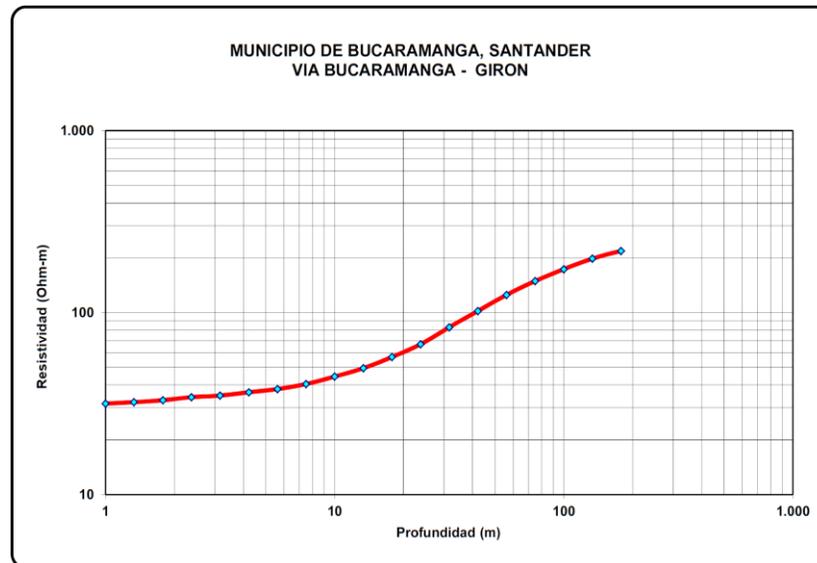
Profundidad investigada:  $ab/2 = 177.80$  m.

Terreno: inclinado

Coordenadas origen Bogotá:  $x = 1'275.966$ ,  $y = 1'104.768$ ,  $z = 812$  msnm

Error relativo: 0.0033

**Figura 31. Grafica de Resistividad vs Profundidad**



Fuente: Autor

**Figura 32. Foto del lugar en donde se ejecutó el SEV-1**



Fuente: Autor

### **7.5.1.3 Observaciones sondeo eléctrico vertical sev – 1:**

La presente sección Geofísica presenta un depósito aluvial de arenas, gravas y arcillas depositados sobre un Cuaternario más antiguo compuesto por gravas, arenas y arcillas correlacionables con el miembro Órganos de la Formación Bucaramanga suprayaciendo a rocas Jurásicas integradas por areniscas fracturadas e intercaladas con arcillolitas, correlacionables con la Formación Girón.

La información de resistividad da la evidencia de posibles niveles con recurso hídrico, para un posible acuífero, ubicados en las unidades Geoeléctricas III, V y VI.

### **7.5.1.4. Conclusiones y recomendaciones (del estudio geofísico de resistividad):**

De acuerdo con las observaciones de campo efectuadas y la interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical SEV-1, realizado en el sector de interés geotécnico, es posible obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- ◆ La interpretación del sondeo muestra un equilibrio entre las resistividades verdaderas con el espesor y profundidad de las diferentes unidades Geoeléctricas definidas en la solución final.
- ◆ Actualmente puede observarse una geoforma a manera de terrazas escalonadas interrumpidas lateral y frontalmente por procesos en los que actúa la gravedad, las propiedades físicas de los materiales que los componen y los agentes que los activan siendo el agua subterránea el principal de ellos; este material coluvial presenta una inclinación hacia el SW.

- ◆ La litología para el sector corresponde a un depósito delgado de sedimentos de origen aluvial de edad cuaternaria, principalmente compuestos por arenas, limos y gravas de areniscas, granodioritas y neises en una matriz arcillo-arenosa correlacionables con el miembro Órganos de la Formación Bucaramanga; su edad corresponde desde finales del Terciario, bajo condiciones Fluvio-lacustres (a manera de conos, abanicos, terrazas y rellenos del valle aluvial), que ocupan toda la zona deprimida, caracterizados por su litología, estructura y por lo tanto por su comportamiento hidrogeológico, pero que tienen en común su naturaleza clástica, suprayaciendo a sedimentos jurásicos compuesto por una intercalación de areniscas de grano fino, lodolitas, areniscas conglomeráticas y arcillolitas, rocas ricas en óxidos de hierro correlacionables con la Formación Girón. Esta litología corresponde plenamente con las unidades geoeléctricas identificadas en la interpretación del correspondiente sondeo geoeléctrico.
- ◆ Las unidades Geoeléctricas III, V y VI se encuentran con cierto grado de humedad para un acuitardo.
- ◆ La zona principal de recarga parece ser el resultado de la infiltración directa de las precipitaciones que ocurren en el área y el aporte de las aguas precipitadas en la zona montañosa durante la estación lluviosa y a las aguas de escorrentía presentes en la zona.
- ◆ La zona presenta un grado de meteorización medio a alto, lo cual conjuntamente con la componente tectónica tiende a incrementar la porosidad secundaria, facilitando la acumulación y movimiento del agua subterránea en el basamento jurásico.
- ◆ El Basamento Jurásico se encuentra posiblemente a los 140 m de profundidad aproximadamente en el sector donde se ejecutó el Sondeo Geoeléctrico.

- ◆ La profundidad del Nivel Freático (NF) para el día de la toma de datos de campo se encontraba aproximadamente a los 15 m de profundidad.

Con el estudio de Microzonificación realizado por Ingeominas, este sector donde se realizó el Sondeo eléctrico Vertical SEV-1 corresponde geotécnicamente como 4B describiéndose como Miembro Órganos afectado por procesos erosivos (ver Anexo c).

Con este estudio, se cumplió el objetivo de encontrar el nivel de aguas freáticas y el nivel del basamento rocoso. También se concluyó que el único depósito en el sitio sobre la parte más baja es el miembro órganos de la formación Bucaramanga.

### **7.5.2. Sondeos y ensayos**

Se realizaron los siguientes ensayos.

Ensayos de Penetración estándar, en la zona de rellenos.

Uno de los objetivos de este ensayo de penetración estándar, es, determinar la profundidad aproximada de los rellenos ubicados en este sector y las características de los materiales de estos. .

De este relleno, realizado con materiales del miembro limos rojos se obtuvieron muestras inalteradas de superficie para la realización otros laboratorios.

**Figura 33. Registro fotográfico para ensayos**



Fuente: Autor

**Tabla 2. Resultados del ensayo de penetración estándar.**

SONDEO	Profundidad de rechazo	N promedio	$V_p=35.734N+89.306$ (m/seg)	$V_s=V_p/2.5$ (m/seg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.5	20	803	321	1680
2	4	16	661	264	1680

Fuente: Autor

- El valor de G es calculado con relación de Poisson = 0.5
- Los valores de  $V_p$ ,  $V_s$  y E se calcularon con base en el trabajo de D.F. Aguilar y R.G. Serrano, “Correlación de los resultados de ensayo de refracción sísmica y de SPT realizados en la línea de conducción de agua potable para la ciudad de Loja, entre las abscisas 11+000 y 16+840”
- Los valores de G y relación de Poisson, se obtuvieron según A y B.

Los datos de penetración fueron usados solo en el primer miembro (limos rojos) para determinar por correlación los valores de velocidad de onda  $V_p$  y  $V_s$ .

Se realizó un solo sondeo de penetración estándar en el sitio considerado como relleno. En este lugar de estudio se realizó hace algún tiempo unos rellenos con material de limos rojos, producto de una explanación dentro de la ciudad, estos fueron colocados en un espesor de 4 metros, en un área aproximada de 2 hectáreas, donde hoy se colocan temporalmente las carpas de circos o ferias artesanales.

Se tomaron muestras en los taludes, donde afloran cada una de los miembros de la formación Bucaramanga, con el fin de realizar ensayos de triaxial dinámico, ensayos de ultrasonido para determinar velocidad de onda (pundit), ensayos de cristalografía y ensayos de clasificación.

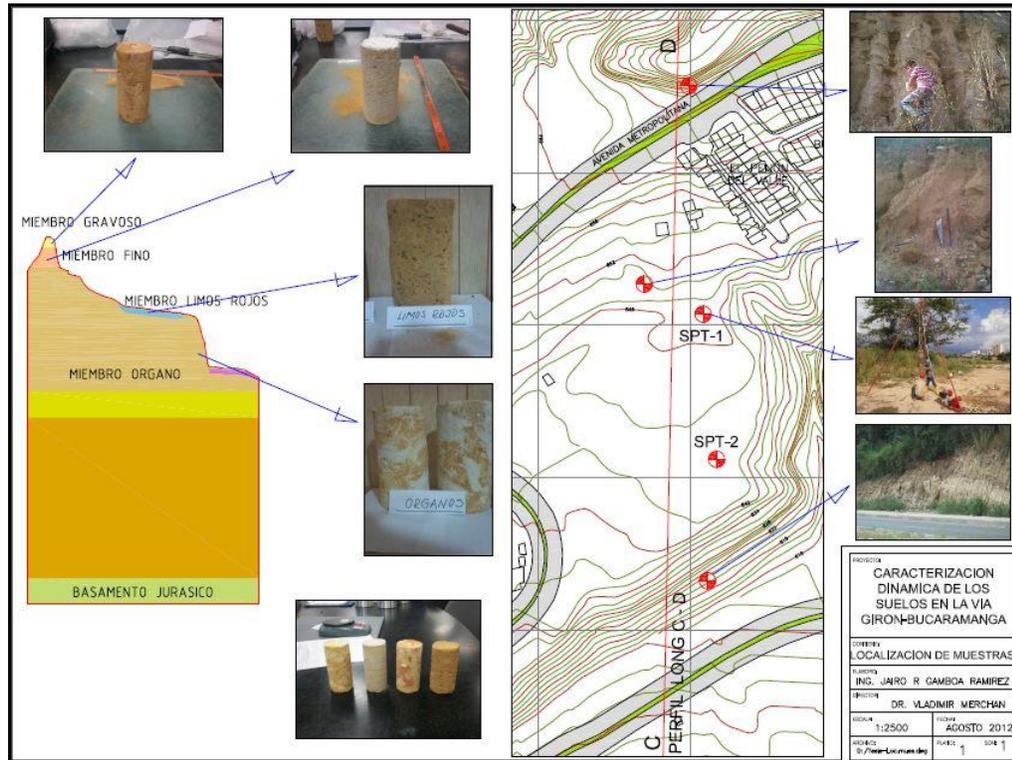
Las muestras fueron obtenidas de la matriz de cada una de las formaciones, en los afloramientos de estos sobre una línea de perfil definido, de tal forma que cada muestra tuvo que ser tallada a mano para poder realizar los laboratorios en cada situación.

**Figura 34. Registro fotográfico de tallado de las muestras**



**Fuente:** Autor

**Figura 35. Ubicación de toma de muestras**



Fuente: Autor

### 7.5.3 Ensayos Dinámicos

#### 7.5.3.1. Triaxial cíclico:

Este ensayo está normalizado bajo la norma ASTM 3999. La versión de norma usada es 2011.

El concepto usado en el ensayo triaxial cíclico se fundamenta en simular con aproximación las condiciones del sitio de una muestra de suelo, sometidas a un esfuerzo desviador cíclico que induce esfuerzos de corte en la muestra.

Las muestras usadas para este ensayo fueron las siguientes:

**Figura 36. Muestras usadas para el ensayo triaxial cíclico**



**Fuente:** Autor

En orden, miembro órganos, finos, gravoso y limos rojos.

Las muestras se sometieron a un esfuerzo de confinamiento  $\sigma'_3$ , calculado con base en las alturas de sobrecarga a las que se encontraban al momento de su extracción.

**Tabla 3. Esfuerzos efectivos**

	<b>Kf/cm2</b>	<b>KPa</b>
<b>Miembro órganos</b>	0.23	22.6
<b>Miembro finos</b>	0.53	52.0
<b>Miembro gravoso</b>	0.21	20.6
<b>Miembro limos rojos</b>	0.21	20.6

**Fuente:** Autor

Las muestras se ensayaron por deformación controlada, con aplicación de 40 ciclos en condiciones naturales sin saturar ni consolidar.

Las muestras no se saturaron, ni consolidaron; las condiciones del sitio no exigían esta situación para el ensayo.

Las muestras fueron llevadas y procesadas en la Universidad EAFIT de Medellín.

### **7.5.3.2 Resultados e interpretación (del ensayo Triaxial):**

Los resultados obtenidos del ensayo Triaxial cíclico, arrojaron los siguientes resultados: (fuente triaxiales EAFIT)

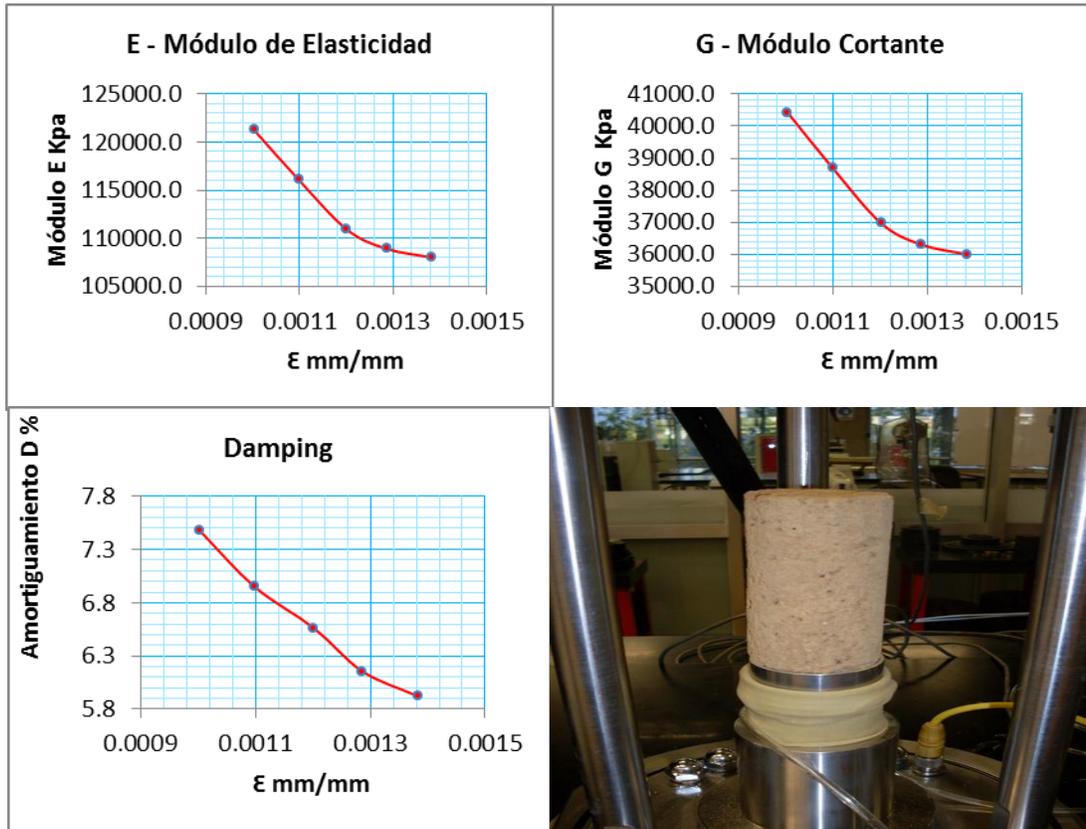
- Del miembro limos rojos

**Tabla 4. Resultado del ensayo Triaxial cíclico en limos rojos.**

<b><math>\epsilon</math></b>	<b>mm/mm</b>	<b>0.001003</b>	<b>0.001098</b>	<b>0.001201</b>	<b>0.001286</b>	<b>0.001382</b>
<b>E</b>	Kpa	121.271.4	116.076.4	110.910.4	108.909.7	108.002.6
<b>D</b>	%	7.5	6.9	6.6	6.2	5.9
<b>G</b>	KPa	40.423.8	38.692.1	36.970.1	36.303.2	36.000

Fuente: Autor

**Figura 37. Gráficas y registro fotográfico del ensayo.**



Fuente: Autor

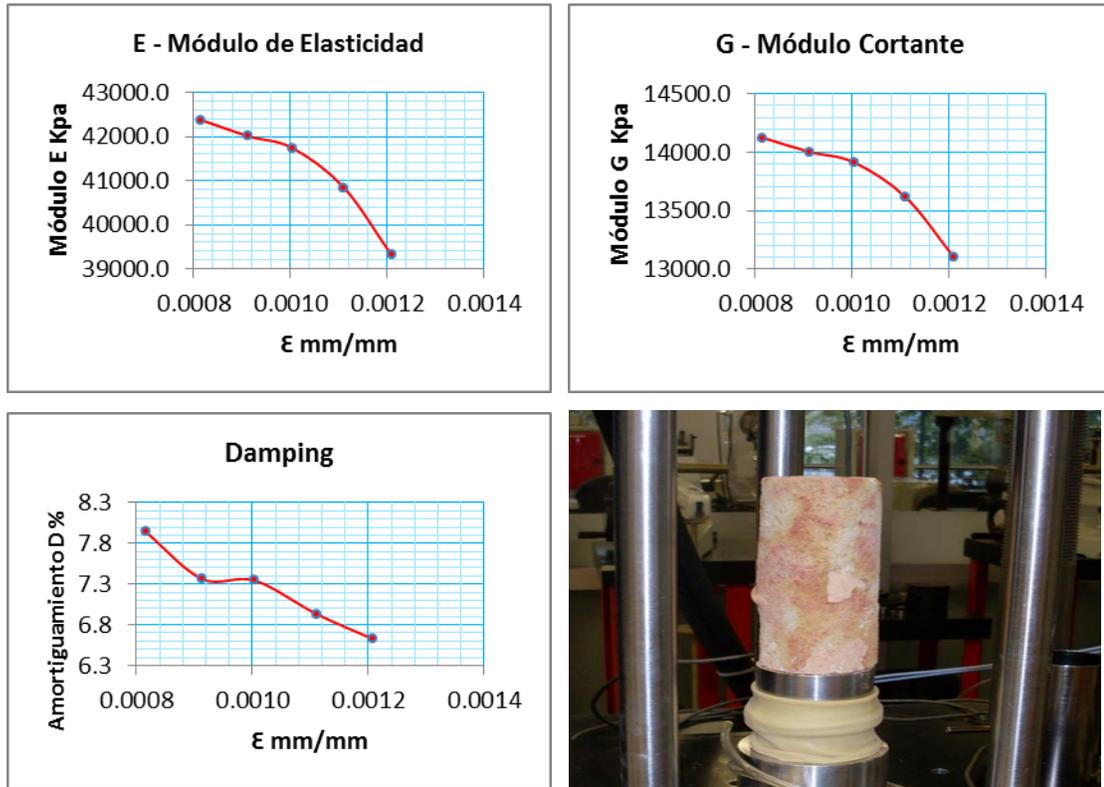
- Del miembro Gravoso

**Tabla 5 Resultados del ensayo triaxial ciclico en suelo gravoso.**

$\epsilon$	mm/mm	0.000766	0.000863	0.000954	0.001061	0.001159
<b>E</b>	Kpa	42.375.2	42.009.7	41.740.5	40.841.7	39.314.2
<b>D</b>	%	7.9	7.4	7.3	6.9	6.6
<b>G</b>	KPa	14.125.1	14.003.2	13.913.5	13.613.9	13.104.7

Fuente: Autor

**Figura 38. Gráficas y registro fotográfico**



Fuente: Autor

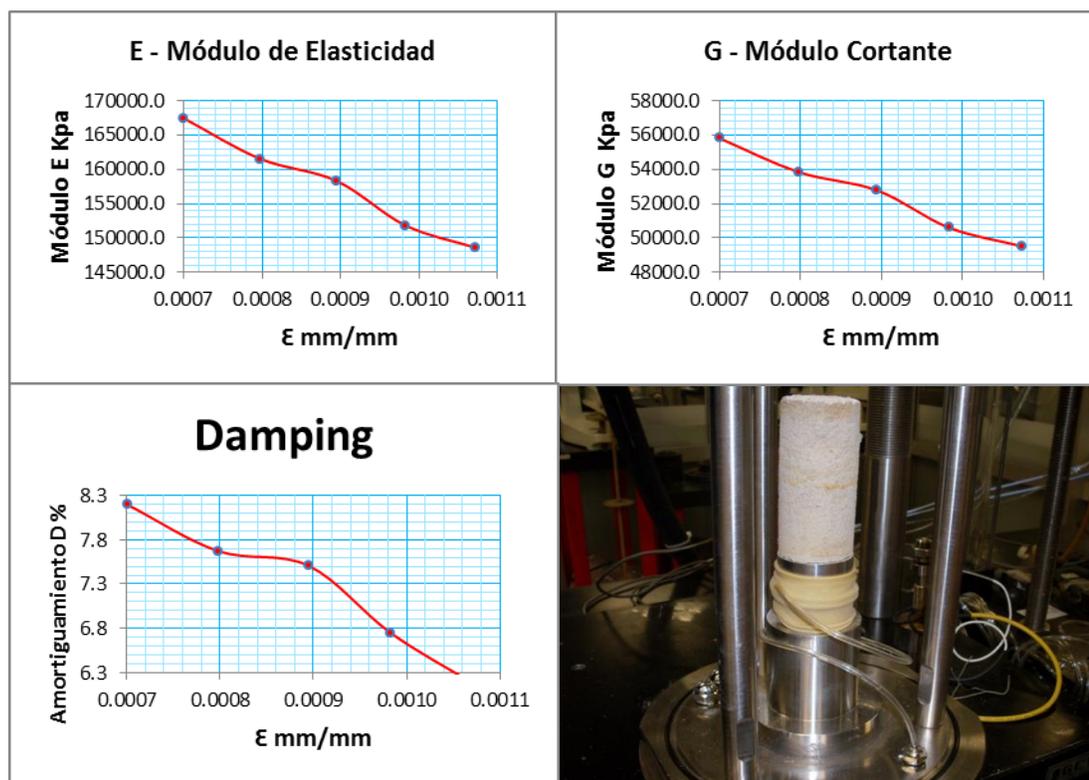
- Del miembro Finos

**Tabla 6 .Resultados del ensayo traxial cíclico en suelo fino**

ε	mm/mm	0.000650	0.000748	0.000845	0.000933	0.001023
<b>E</b>	Kpa	167.437.5	161.527.8	158.335.6	151.826.6	148.563.7
<b>D</b>	%	8.2	7.7	7.5	6.8	6.2
<b>G</b>	KPa	55.812.5	53.842.6	52.778.5	50.608.9	49.521.2

Fuente: Autor

**Figura 39. Gráficas y registro fotográfico**



Fuente: Autor

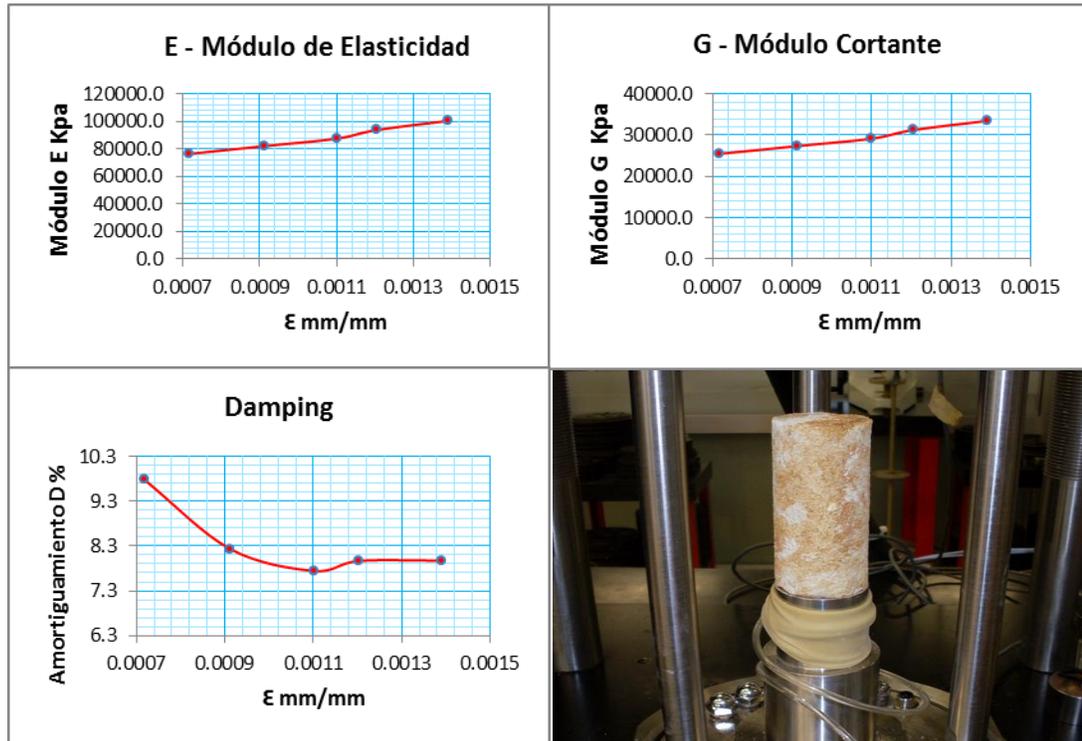
- Del miembro Órganos

**Tabla 7. Resultados del ensayo triaxial cíclico en el miembro órganos.**

ε	mm/mm	0.000668	0.000862	0.001050	0.001154	0.001341
<b>E</b>	Kpa	76.463.4	82.033.4	87.504.2	93.703.7	100.516.3
<b>D</b>	%	9.8	8.2	7.7	8.0	8.0
<b>G</b>	KPa	25.487.8	27.344.5	29.168.1	31.234.6	33.505.4

Fuente: Autor

Figura 40. Gráficas y registro fotográfico



Fuente: Autor

De los resultados obtenidos tenemos las siguientes observaciones.

- El comportamiento de la relación de amortiguamiento no es compatible con la observación teórica y los resultados de otros estudios.
- En la introducción de datos al programa Quake se usarán los valores obtenidos en el ensayo para ajustar las curva de amortiguación.

Podemos extraer un resumen de los parámetros encontrados.

**Tabla 8. Parámetros determinados con el ensayo**

RESULTADOS	$\sigma_3$ (Kpa)	No de Ciclos	Fre (Hz)	Gmax KPa	Gmin KPa	Gprom KPa	Dmax	Dmin	Dprom %	E <sub>max</sub> KPa	E <sub>min</sub> KPa	E <sub>prom</sub>
Miembro Órganos	22.6	40	1	33.505	25.487	29.490	9.8	8	8.9	100.516	76.463	88.485
Miembro Finos	52	40	1	55.812	49.521	54.825	8.2	6.2	7.2	167.437	148.563	157.995
Miembro Gravoso	20.6	40	1	14.125	13.104	13.610	7.9	6.6	7.3	42.375	39.314	40.840
Miembro Limos Rojos	20.6	40	1	40.423	36.000	38.210	7.5	5.9	6.7	121.271	108.002	114.635

Fuente: Autor

Los valores obtenidos de los módulos de Corte y Elástico, se obtuvieron en el laboratorio con base en un valor de relación de Poisson de 0.5 (datos suministrados por el laboratorio).

La relación de Poisson, puede ser determinada con base en las velocidades de ondas en el terreno. El valor teórico de la relación de velocidades para una tierra elástica, isotrópica y homogénea, está estimada en  $V_p/V_s=1.73$ . La relación de Poisson puede ser obtenida a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{1}{1 - 2\nu}, \quad \text{Ecuación 21}$$

Despejando tenemos

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 22}$$

Donde

$V_p/V_s$  = Relación de velocidades

$\nu$  = relación de Poisson

Estos valores de la relación de Poisson, van a depender fundamentalmente de las características de cada estrato en el cual se propagan las ondas sísmicas.

Necesitamos conocer los valores de velocidad de onda  $V_p$  y  $V_s$ , las cuales las podemos determinar usando La velocidad de onda de ultrasonido PUNDIT.

### **7.3.2. Ensayo de velocidad de ondas – PUNDIT<sup>7</sup>**

En este ensayo se suministra una vibración a la muestra y se mide el tiempo requerido para la propagación a lo largo de la longitud de la muestra, entre dos caras paralelas.

Mediante este ensayo puede obtenerse la velocidad de propagación de las ondas compresionales  $V_p$ , y la velocidad de las ondas transversales  $V_s$ .

El equipo utilizado está constituido por un generador de impulsos, dos transductores, emisor y receptor (dos para ondas p y dos para ondas S), equipados con cristal de cuarzo y osciloscopio para medir el tiempo de recorrido de la onda.

Para cada uno de los miembros estudiados (4), se tomaron dos muestras, para un total de 8 muestras y 16 datos (dos por cada muestra); cada muestra consistió de una probeta cilíndrica y una prismática rectangular de 5 cm de diámetro o lado y 10 cm de altura.

---

<sup>7</sup> F.J. Alonso et al. 1985.

**Figura 41. Equipo utilizado para el ensayo y muestras a utilizar.**



Fuente: Autor

Con los valores tiempo de transmisión de onda P y onda S, obtenidos con el laboratorio Pundit, podemos determinar el Módulo de onda P (M) y el módulo cortante (G).

$$\text{Módulo de onda P (M):} \quad M = Vp^2 * \rho \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del material y  $Vp$  es la velocidad del pulso de la onda P.

$$\text{Módulo cortante (G):} \quad G = Vs^2 * \rho \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del material y  $Vs$  es la velocidad del pulso de la onda S.

La siguiente tabla muestra como las propiedades elásticas de un material se pueden calcular de otros dos conocidos.

**Tabla 9. Propiedades elásticas de un material**

Elastic moduli for homogeneous isotropic materials [hide]										
Bulk modulus ( $K$ ) • Young's modulus ( $E$ ) • Lamé's first parameter ( $\lambda$ ) • Shear modulus ( $G$ ) • Poisson's ratio ( $\nu$ ) • P-wave modulus ( $M$ )										
Conversion formulas [hide]										
Homogeneous isotropic linear elastic materials have their elastic properties uniquely determined by any two moduli among these, thus given any two, any other of the elastic moduli can be calculated according to these formulas.										
	$(\lambda, G)$	$(E, G)$	$(K, \lambda)$	$(K, G)$	$(\lambda, \nu)$	$(G, \nu)$	$(E, \nu)$	$(K, \nu)$	$(K, E)$	$(M, G)$
$K =$	$\lambda + \frac{2G}{3}$	$\frac{EG}{3(3G-E)}$		$K - \frac{2G}{3}$	$\frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu}$	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$			$M - \frac{4G}{3}$
$E =$	$\frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G}$		$\frac{9K(K-\lambda)}{3K-\lambda}$	$\frac{9KG}{3K+G}$	$\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	$2G(1+\nu)$		$3K(1-2\nu)$		$\frac{G(3M-4G)}{M-G}$
$\lambda =$		$\frac{G(E-2G)}{3G-E}$		$K - \frac{2G}{3}$		$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{3K\nu}{1+\nu}$	$\frac{3K(3K-E)}{9K-E}$	$M - 2G$
$G =$			$\frac{3(K-\lambda)}{2}$		$\frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu}$		$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	$\frac{3KE}{9K-E}$	
$\nu =$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$	$\frac{E}{2G} - 1$	$\frac{\lambda}{3K-\lambda}$	$\frac{3K-2G}{2(3K+G)}$					$\frac{3K-E}{6K}$	$\frac{M-2G}{2M-2G}$
$M =$	$\lambda + 2G$	$\frac{G(4G-E)}{3G-E}$	$3K - 2\lambda$	$K + \frac{4G}{3}$	$\frac{\lambda(1-\nu)}{\nu}$	$\frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}$	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{3K(1-\nu)}{1+\nu}$	$\frac{3K(3K+E)}{9K-E}$	

Fuente: Wikipedia

Del ensayo PUNDIT, solo se pudieron obtener los valores de onda Vp. Por lo tanto los demás valores se obtendrán de correlaciones teóricas aplicables.

Los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonido

El valor de  $M = Vp^2 * \rho$  , Kpa, (V (m/seg),  $\rho$ =KN/m3)

**Tabla 10. Resultados del ensayo Pundit**

RESULTADOS	lectura 1	Lectura 2	Vp (m/seg)	Densidad KN/m3	M (Kpa)
Miembro Órganos	1158	1103	1130	18.42	23.5E6
Miembro Finos	1266	1271	1269	19.21	30.95E6
Miembro Gravoso	704	750	727	17.35	9.2E6
Miembro Limos Rojos	1203	1141	1172	16.47	22.6E6

Fuente: Autor

Con los valores de los módulos de onda P (M) obtenidos a través del ensayo PUNDIT y con los valores del módulo de Young (E), encontrados en el Triaxial cíclico podemos encontrar el valor de la relación de Poisson usando las correlaciones de la tabla 8.

Decimos que:

$$M = \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \rho V_p^2 \text{ Ecuación 25}$$

Y tenemos que

$$G = V_s^2 * \rho = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ Ecuación 26}$$

Y

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \text{ Ecuación 27}$$

E y  $V_p$  son conocidos, tenemos entonces

$$V_s^2 = \frac{G}{\rho} \text{ Ecuación 28}$$

Y

$$\frac{G}{\rho} = \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \text{ Ecuación 29}$$

Remplazando  $V_s$  en función de E, tenemos la siguiente ecuación:

$$-4V_p^2 * \rho * \nu^2 + 2V_p^2 * \rho - 2E * \nu - 2V_p^2 * \rho + 2E = 0 \text{ Ecuación 30}$$

Esta fórmula tiene solución de la forma

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ Ecuación 31}$$

En donde

$$v = \frac{-(2Vp^2 * \rho - 2E) \pm \sqrt{(2Vp^2 * \rho - 2E)^2 - 4(-4Vp^2 * \rho)(-2Vp^2 * \rho + 2E)}}{2(-4Vp^2 * \rho)}$$

Ecuación 32

Remplazando los valores de Vp y E encontrados en los laboratorios de Pundit y Triaxial dinámico, encontramos los siguientes valores de relación de Poisson.

Poisson 1 (con la parte positiva de la ecuación)

**Tabla 11. Valores de relación de Poisson**

Densidad	Vp	E <sub>max</sub>	E <sub>min</sub>	E <sub>prom</sub>	Parámetros			R de Poisson
KN/m <sup>3</sup>	m/seg	Kpa			a	b	c	u
18.43	1132	100510	76460	88485	-94473612.5	47059836.3	-2385878	0.057
19.22	1269	167430	148560	157995	-123776767	61572393.5	-2904732	0.053
17.42	726	42370	39310	40840	-36729962.8	18283301.4	-972472	0.061
16.47	1172	121270	108000	114635	-90494945.9	45018202.9	-2517898	0.064

Fuente: Autor

Estos valores están fuera del rango probable de valores de Poisson para suelos.

Poisson 2 (con la parte negativa de la ecuación)

**Tabla 12. Valores de relación de Poisson**

Densidad	Vp	E <sub>prom</sub>	Parámetros			R de Poisson
KN/m <sup>3</sup>	m/seg	Kpa	a	b	c	u
18.43	1132	88485	-94473612.5	47059836.3	-2385878	0.441
19.22	1269	157995	-123776767	61572393.5	-2904732	0.445
17.42	726	40840	-36729962.8	18283301.4	-972472	0.437

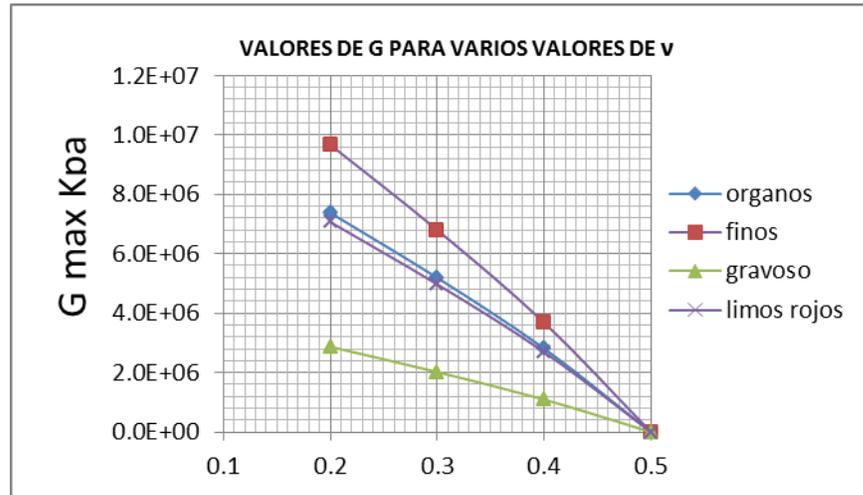
Densidad	Vp	Eprom	Parámetros			R de Poisson
KN/m3	m/seg	Kpa	a	b	c	u
16.47	1172	114635	-90494945.9	45018202.9	-2517898	0.433
		Emin				
18.43	1132	76460	-94473612.5	47083886.3	-2409928	0.440
19.22	1269	148560	-123776767	61591263.5	-2923602	0.444
17.42	726	39310	-36729962.8	18286361.4	-975532	0.437
16.47	1172	108000	-90494945.9	45031472.9	-2531168	0.433
		Emax				
18.43	1132	100510	-94473612.5	47035786.3	-2361828	0.441
19.22	1269	167430	-123776767	61553523.5	-2885862	0.445
17.42	726	42370	-36729962.8	18280241.4	-969412	0.437
16.47	1172	121270	-90494945.9	45004932.9	-2504628	0.433

Fuente: Autor

Los valores de relación de Poisson obtenidos en la segunda tabla son aceptables para las condiciones de los materiales ensayados, por consiguiente serán los usados en el programa Quake, dejando en promedio un valor de 0.45 como valor representativo.

Un análisis de sensibilidad nos muestra como se ve afectado el valor de G con la variación de la relación de Poisson para cada uno de los miembros de la formación Bucaramanga, usando la expresión A mencionada arriba.

**Figura 42. Valores de G para varios valores de v**



Fuente: Autor

Como las deformaciones en el ensayo PUNDIT, oscilan alrededor de 1E-3%, el valor de M que encontremos oscilará alrededor del valor Mmax y este nos dará por consiguiente el valor de Gmax, pasando primero por encontrar el valor de Vs correspondiente.

**Tabla 13. Resultados del ensayo de ultrasonido.**

Ultrasonido					
MIEMBRO	Vp (m/seg)	Vs(m/seg)	Poisson u	Gmax (Kpa)	Emax (Kpa)
ORGANOS	1132	341	0.45	2.147.128	6.226.671
FINOS	1269	383	0.45	2.813.108	8.158.013
GRAVOSO	726	219	0.45	834.772	2.420.838
LIMOS ROJOS	1172	353	0.45	2.056.703	5.964.438

Fuente: Autor

Estos valores de Gmax parecen más razonables, si consideramos que los valores de G obtenidos en el ensayo Triaxial cíclico oscilan entre 13.000 y 56.000 KPa y el

valor de relación de Poisson (0.45) es bastante aproximado al encontrado dentro del ensayo de SPT.

Sin embargo, después de realizar varios análisis en el programa Quake, hemos encontrado que este programa aumenta el valor de la relación de Poisson a 0.49, con lo que el valor de Gmax debe reducirse sustancialmente. Al hacer estos cambios en el valor de la relación de Poisson, encontramos:

**Tabla 14. Valores obtenidos para Gmax con el recalcu de Poisson**

Ultrasonido				
MIEMBRO	Vp (m/seg)	Vs(m/seg)	**Poisson u	Gmax (Kpa)
ORGANOS	1132	159	0.49	463,106
FINOS	1269	178	0.49	606,749
GRAVOSO	726	102	0.49	180,049
LIMOS ROJOS	1172	164	0.49	443,603

Fuente: Autor

En general, los datos obtenidos y que se introducirán en Quake son los siguientes:

**Tabla 15. Datos de entrada para el programa QUAKE/W**

RESULTADOS	TRIAXIAL Y PUNDIT																	G (Kpa)	
	$\sigma^3$ (Kpa)	No de Ciclos	Fre (Hz)	Dmax (Amortiguación)	E <sub>max</sub>	Densidad KN/m <sup>3</sup>	Gravedad específica	e	S %	LI	Lp	IP	pasa 200	USC	Vp (m/seg)	Vs(m/seg)	Poisson u		Gmax (Kpa)
Miembro Organos	23	40	1	9.8	10051	18.43	2.664	0.5	20	26	16	10	46.5	SC	1132	341	0.45	463,106	<b>29.496</b>
Miembro Finos	52	40	1	8.2	16743	19.22	2.662	0.4	14	24	11	14	42.7	SC	1269	383	0.45	606,749	<b>52.666</b>
Miembro Gravoso	21	40	1	7.9	4237	17.42	2.646	0.5	17	41	20	20	48.2	SC	726	219	0.45	180,049	<b>13.614</b>
Miembro Limos Rojos	21	40	1	7.5	12127	16.47	2.658	0.6	7	23	15	8	40.6	SC	1172	353	0.45	443,603	<b>38.211</b>

Fuente: Autor

#### 7.5.4. Curva de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento.

La curva de degradación del módulo de rigidez, permite conocer la variación del módulo con la variación de la deformación angular o con la variación de otros parámetros como el índice de plasticidad y la presión de confinamiento. En este sentido existen varios trabajos que establecen esta relación. Para este estudio en particular trabajaremos con la fórmula de Ishibashi y Zhang, por ser la utilizada dentro de quake/w para la estimación de la variación del parámetro G. Esta curva está normalizada con la relación G/Gmax.

La curva de degradación está expresada en la forma, de acuerdo con los trabajos de Ishibashi y Zhang, según Kramer,

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_o}$$

Ecuación 33

Parámetro A=

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000102 + n(PI)^{0.492}}{\gamma} \right) \right] \right\}$$

Ecuación 34

Parámetro B=

$$m(\gamma, PI) - m_o = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145PI^{1.3})$$

$$\begin{aligned} n(PI) &= 0.00 && \text{for } PI = 0 \\ n(PI) &= 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} && \text{for } 0 < PI < 15 \\ n(PI) &= 7.00 \times 10^{-7} PI^{1.976} && \text{for } 15 < PI < 70 \\ n(PI) &= 2.70 \times 10^{-5} PI^{1.115} && \text{for } PI > 70 \end{aligned}$$

Ecuación 35

Donde G y Gmax son valores del módulo de rigidez.

Y, es la deformación angular.

Donde Y, es la deformación angular.

PI, es el índice de plasticidad.

$\sigma'_m$ , es el esfuerzo efectivo en el suelo.

El amortiguamiento, B, está definido por Ishibashi y Zhang, como

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145PI^{1.3})}{2} \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right]$$

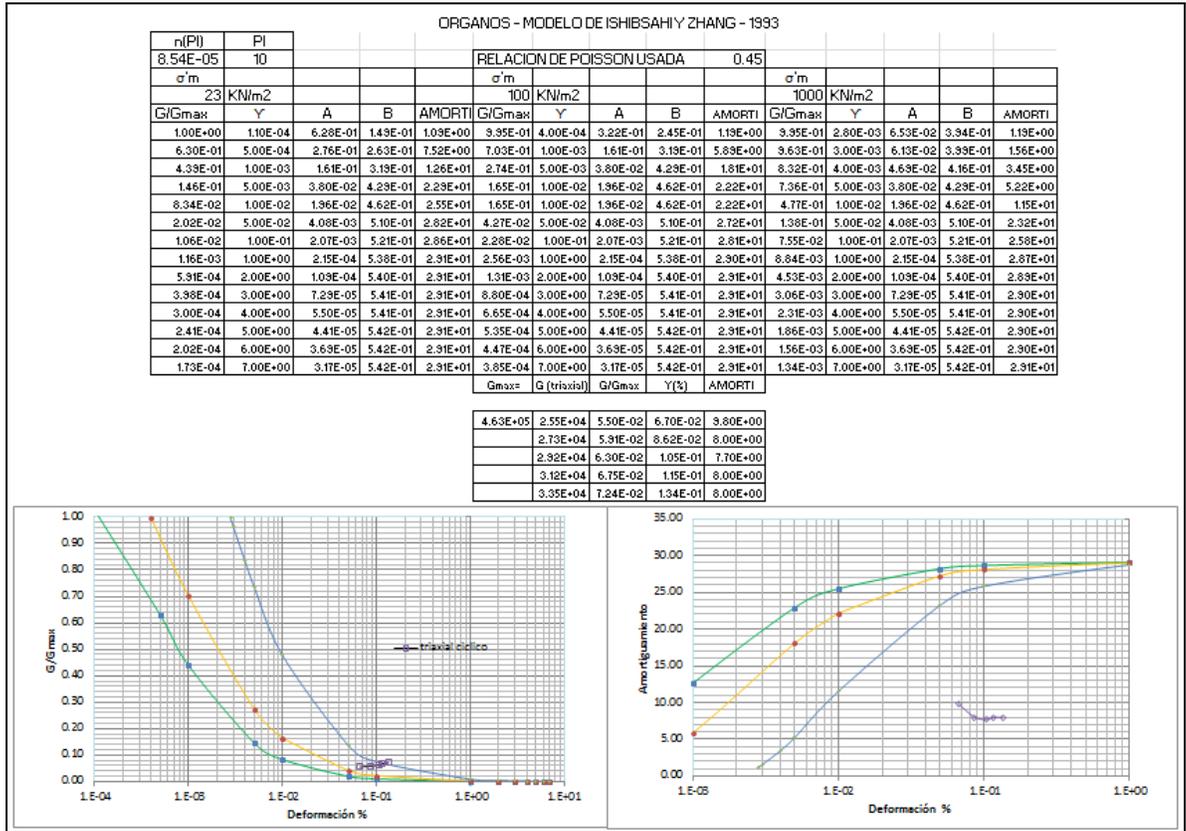
Ecuación 36

$\xi$ , es la fracción de amortiguamiento crítico para el nivel de deformación donde es evaluado G/Gmax.

G/Gmax, calculado de la anterior ecuación.

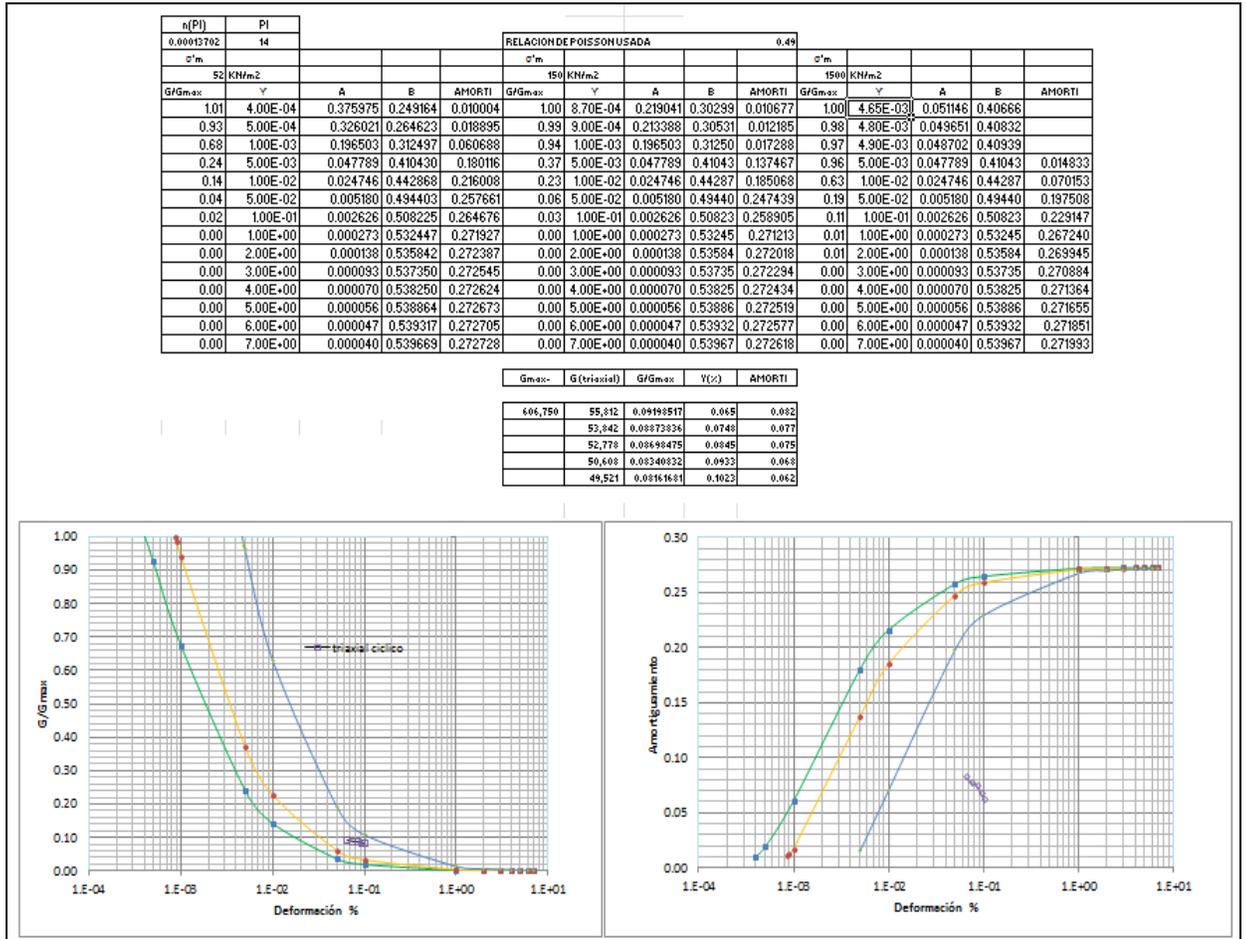
Los valores de estos dos parámetros se muestran a continuación.

Figura 43. Curvas de degradación del módulo cortante miembro órganos.



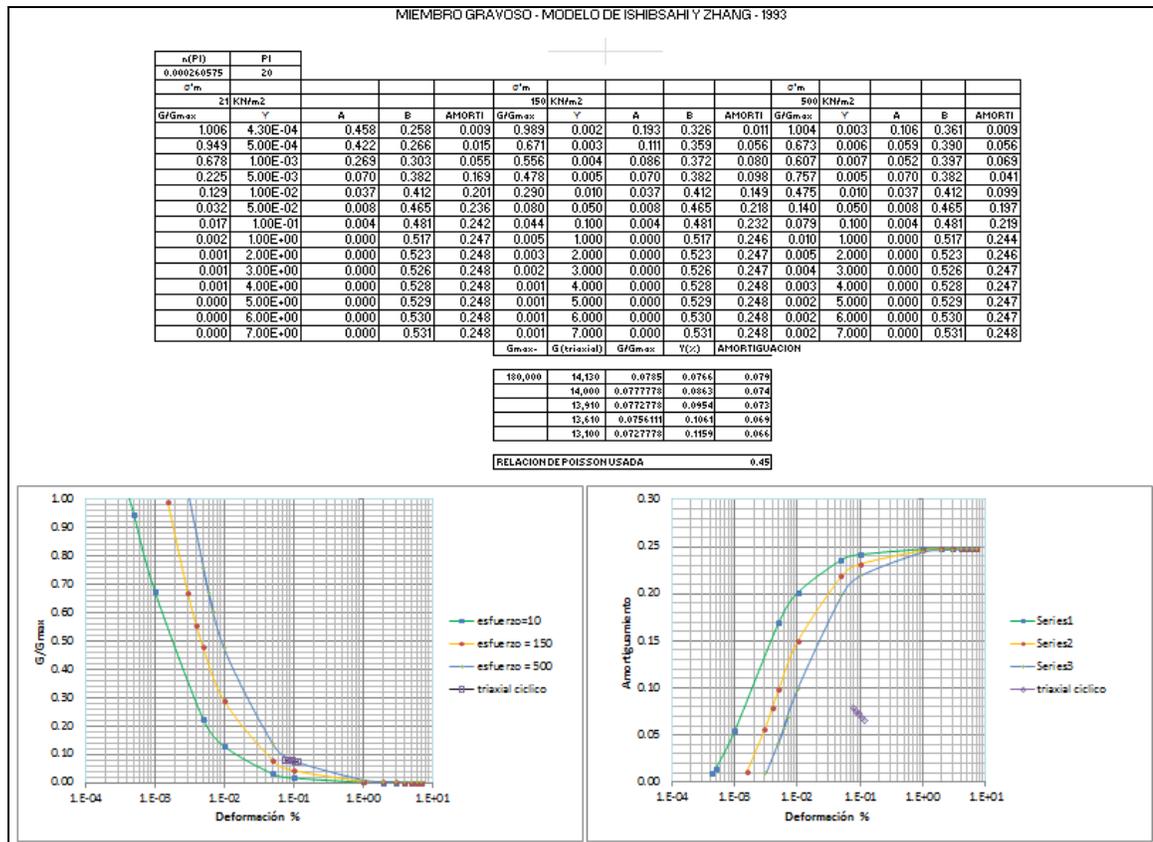
Fuente: Autor

Figura 44. Curvas de degradación del módulo cortante par el miembro finos.



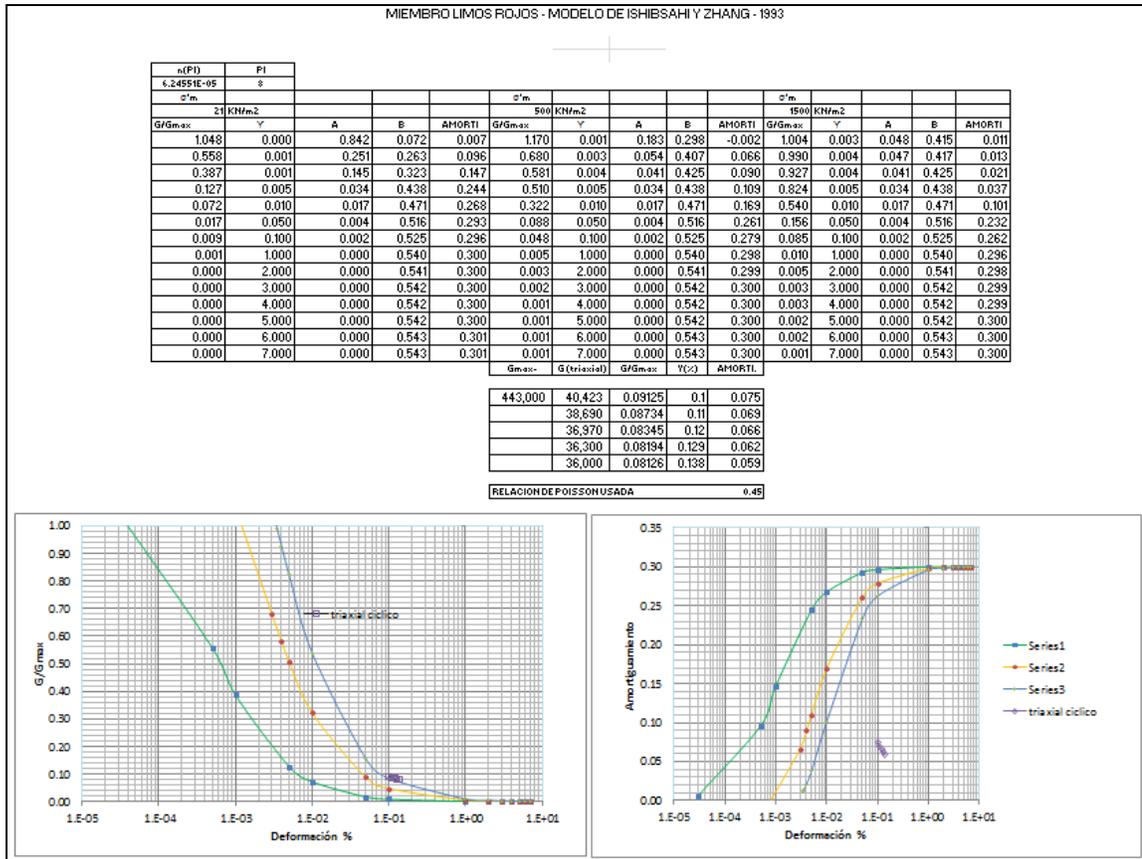
Fuente: Autor

Figura 45. Curvas de degradación del módulo cortante para el miembro gravoso.



Fuente: Autor

**Figura 46. Curvas de degradación del módulo cortante para el miembro de limos rojos**



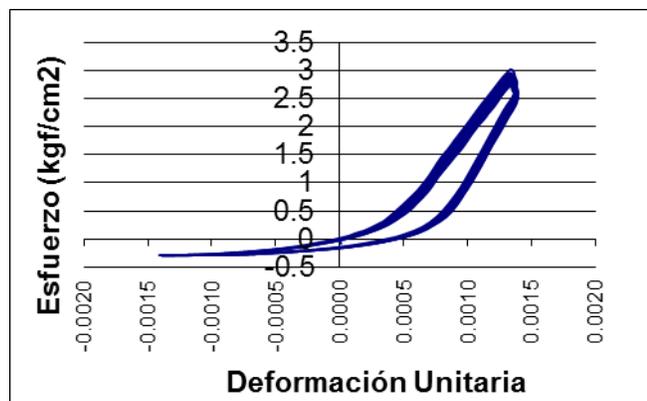
Fuente: Autor

### 7.5.5 Análisis de las curvas de degradación de módulo de corte y amortiguamiento obtenidas en las figuras 43.44.45 y 46

Revisadas las curvas obtenidas y los valores alrededor de los que fluctúa el valor de G, encontramos una buena correlación de valores, dando estos dentro de los rangos de los límites establecidos de  $\sigma'm$  entre 10 y 500. El esfuerzo de confinamiento usado para estos cálculos estuvo alrededor de 20 y 60 KPa, y los valores máximos a los que se trabajará el esfuerzo efectivo es de 3000 KPa, a una profundidad de suelo de 170 m.

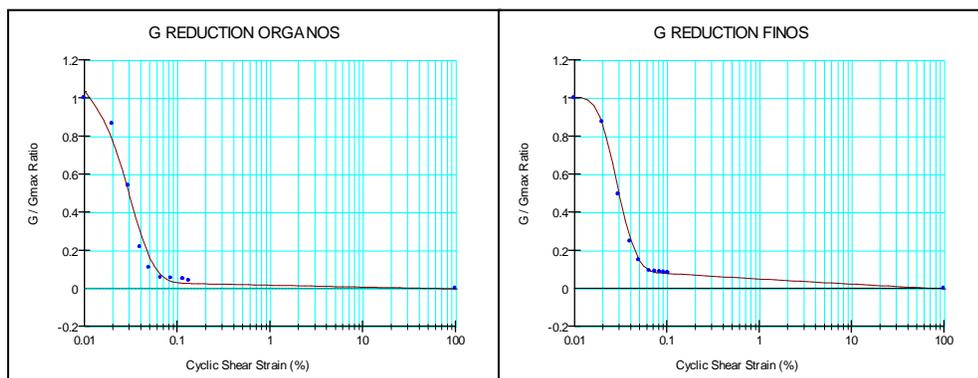
Contrario a lo encontrado con los valores de módulo de corte, el amortiguamiento no muestra un comportamiento como el descrito por Ishibashi y Zhang, y la razón estriba fundamentalmente, en el comportamiento rígido del suelo, incapaz de soportar tensiones o esfuerzos de tracción, según lo observado en las curvas histeréticas de cada ensayo Triaxial. Los valores de amortiguamiento fueron suministrados por la Universidad Eafit de Medellín, donde se realizaron los ensayos triaxiales y fueron calculados según lo establece la norma. El valor de amortiguamiento es el área del triángulo bajo la curva, usando para ello el tercer ciclo de carga y descarga.

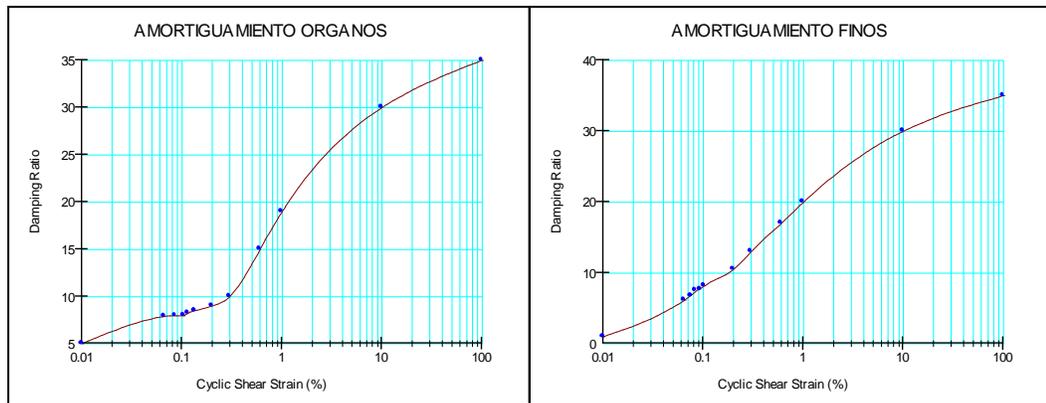
**Figura 47. Curva Histerética del miembro limos rojos para el primer ciclo de carga.**



Fuente: Autor

**Figura 48. Función de reducción de G y Amortiguación calculados en Quake**





Fuente: Autor

En la introducción de datos para el análisis lineal equivalente, las funciones de reducción de G y de amortiguación para todos los miembros de la formación Bucaramanga introducidas en Quake, se adaptaron con los datos obtenidos directamente de los ensayos triaxiales, dando forma a las curvas presentadas en la figura 48. En estas funciones se tuvo presente los datos de  $G_{m\acute{a}x}$  encontradas con la relación de Poisson de 0.49.

Al momento del proceso de datos se tuvo en cuenta un valor de amortiguación de 1%, debido a que durante varios análisis con amortiguaciones de 5% los resultados obtenidos de aceleraciones en superficie fueron bastante pequeñas comparadas con las aceleraciones introducidas en el basamento rocoso.

## 8. SISMOS DE ANALISIS

Con el fin de proporcionar una variedad de contenidos frecuenciales, hemos considerado cuatro sismos importantes ocurridos en los últimos años,

### 8.1 SISMO DE ARMENIA

Acelerograma del sismo de Armenia (Anexo B)

**Figura 49. Datos de entrada para el programa QUAKE/W**

#	Time	Acc. (g)
1	0.005	-0.0001093
2	0.010	-0.0001004
3	0.015	-0.0000987
4	0.020	-0.0001090
5	0.025	-0.0001179
6	0.030	-0.0001124
7	0.035	-0.0001013

**Fuente:** Autor

Los datos de los acelerogramas fueron escalados a 0,25g, con el fin de unificar el valor máximo de aceleración en todos los sismos de prueba. Estos datos se encuentran en el anexo B.

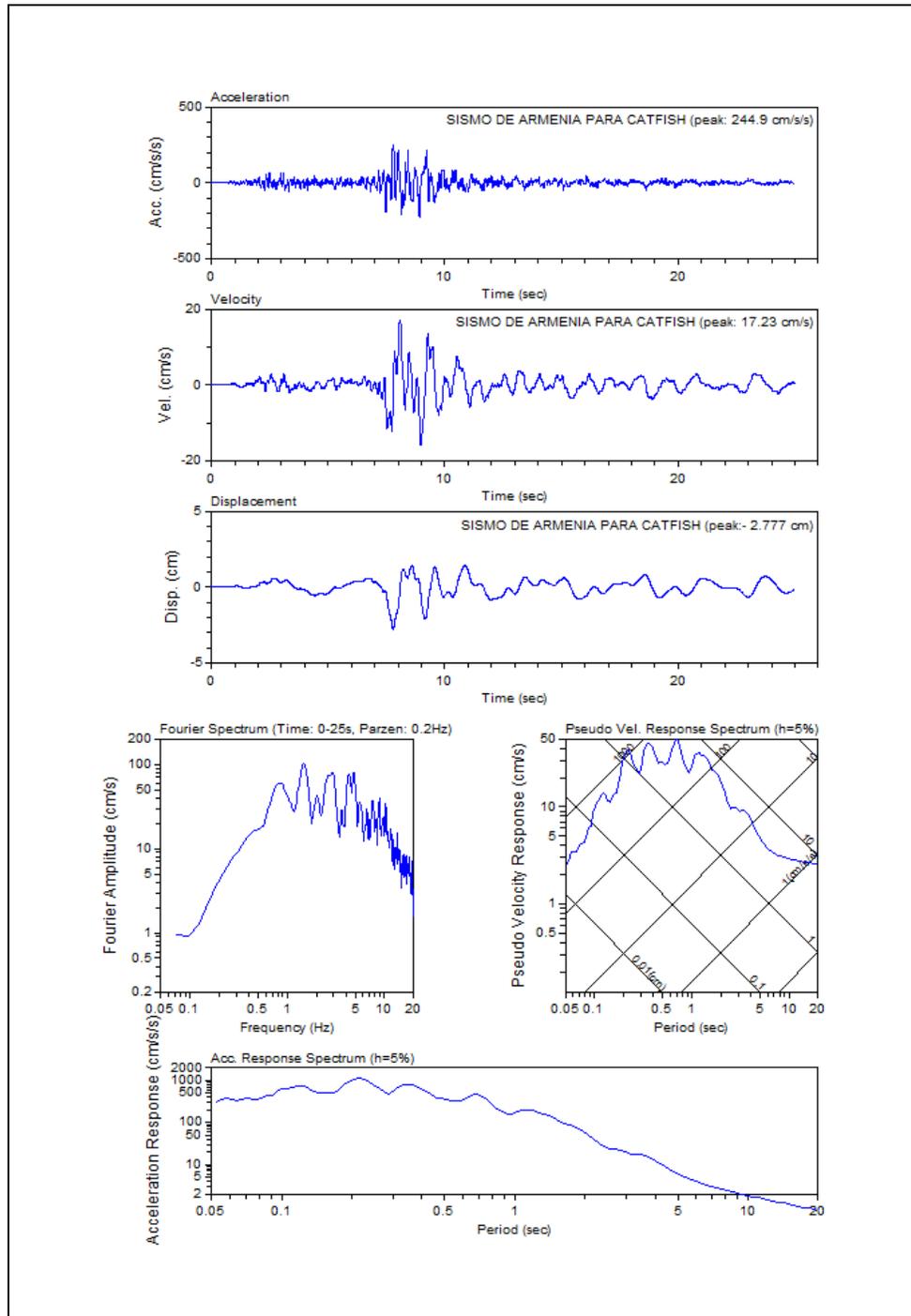
Los resultados de procesar los datos de aceleración con el programa CATFISH, desde los archivos de datos proporcionados a Quake son:

**Tabla 16. Propiedades del sismo**

Pico de aceleración	244.9 cm/seg <sup>2</sup>
Pico de Velocidad máxima	17.23 m/seg
Pico de máximo desplazamiento	2.78 cm
Pico Real de aceleración sin escalar	0.05G
Tiempo de máxima aceleración	7.78 seg
Número de datos	5000
Frecuencia	200 Hz

Fuente: Autor

Figura 50. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish

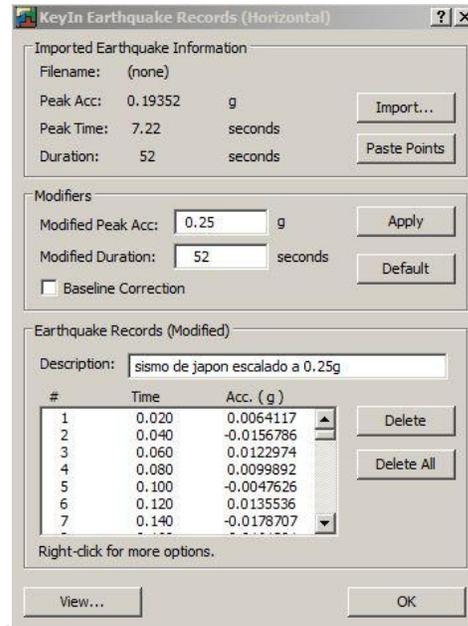


Fuente: Autor

## 8.2 SISMO DE JAPÓN

Acelerograma del sismo de Japón (Anexo B)

**Figura 51. Datos de entrada para el programa QUAKE/W**



Fuente: Autor

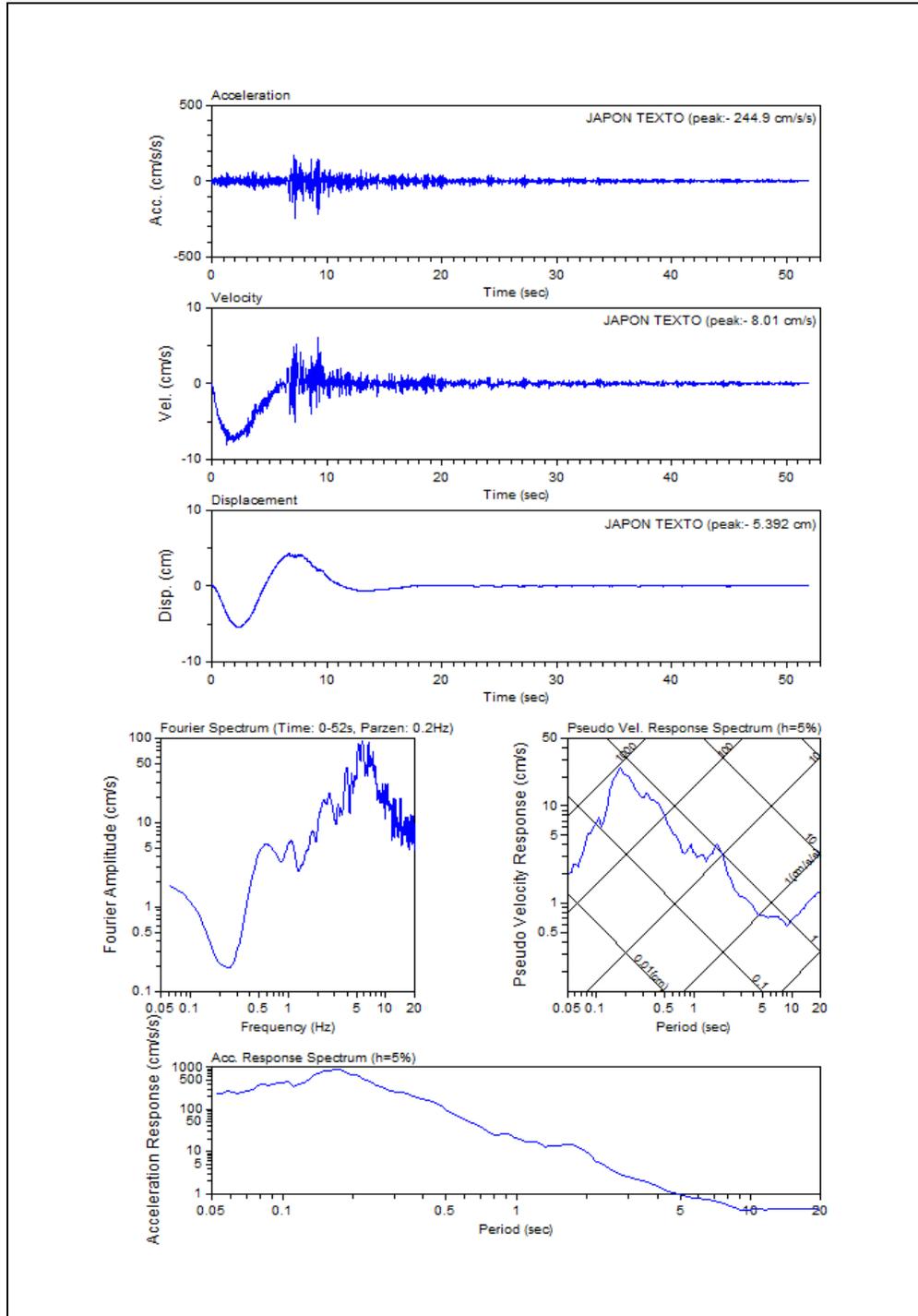
Los resultados de procesar los datos de aceleración con el programa CATFISH, desde los archivos de datos proporcionados a Quake son:

**Tabla 17. Propiedades del sismo**

Pico de aceleración	244.9 cm/seg <sup>2</sup>
Pico de Velocidad máxima	8.01 m/seg
Pico de máximo desplazamiento	5.39 cm
Pico Real de aceleración sin escalar	0.19352 G
Tiempo de máxima aceleración	7.22 seg
Número de datos	2600
Frecuencia	50 Hz

Fuente: Autor

Figura 52. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish

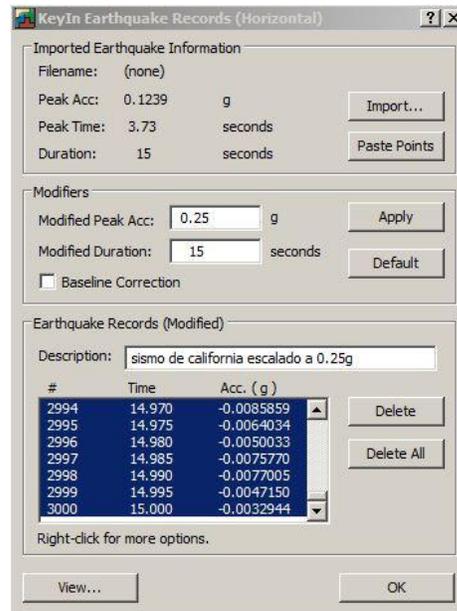


Fuente: Autor

### 8.3 SISMO DE CALIFORNIA

Acelerograma del sismo de California (Anexo B)

**Figura 53. Datos de entrada al programa QUAKE/W**



Fuente: Autor

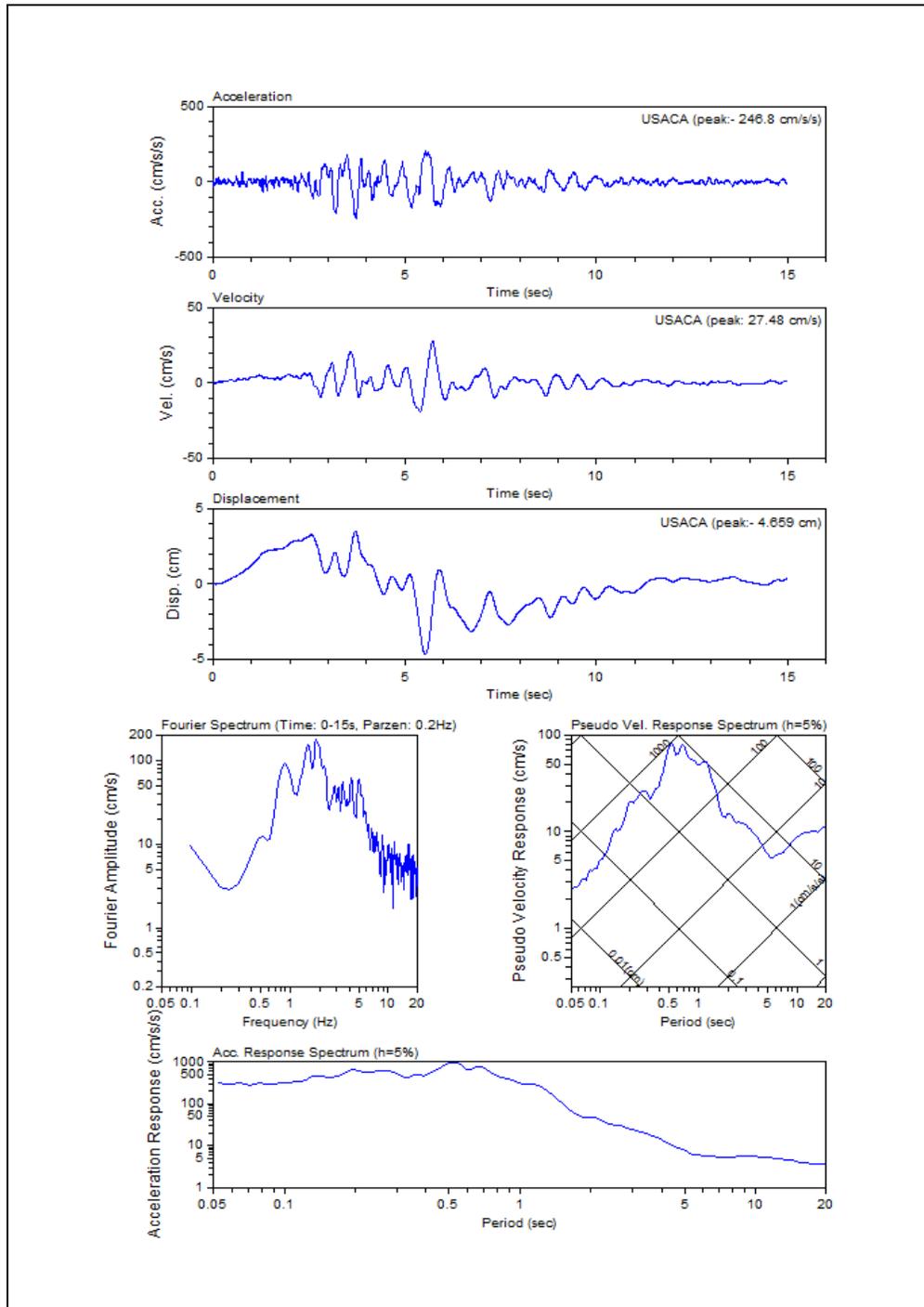
Los resultados de procesar los datos de aceleración con el programa CATFISH, desde los archivos de datos proporcionados a Quake son:

**Tabla 18. Propiedades del sismo**

Pico de aceleración	246.8 cm/seg <sup>2</sup>
Pico de Velocidad máxima	27.48 m/seg
Pico de máximo desplazamiento	4.659 cm
Pico Real de aceleración sin escalar	0.1239 G
Tiempo de máxima aceleración	3.73 seg
Número de datos	3000
Frecuencia	200 Hz

Fuente: Autor

Figura 54. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish

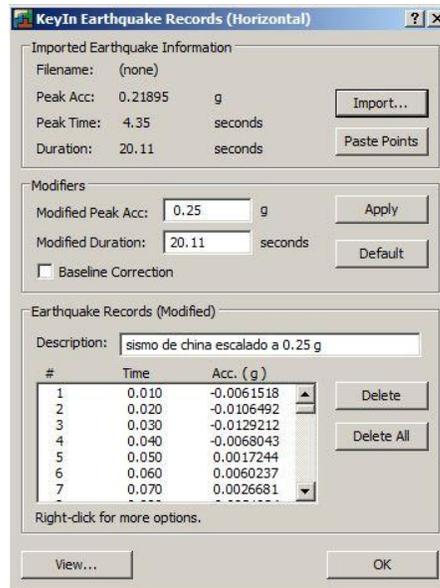


Fuente: Autor

## 8.4 SISMO DE CHINA.

Acelerograma del sismo de China (Anexo B)

**Figura 55. Datos de entrada al programa QUAKE/W**



Fuente: Autor

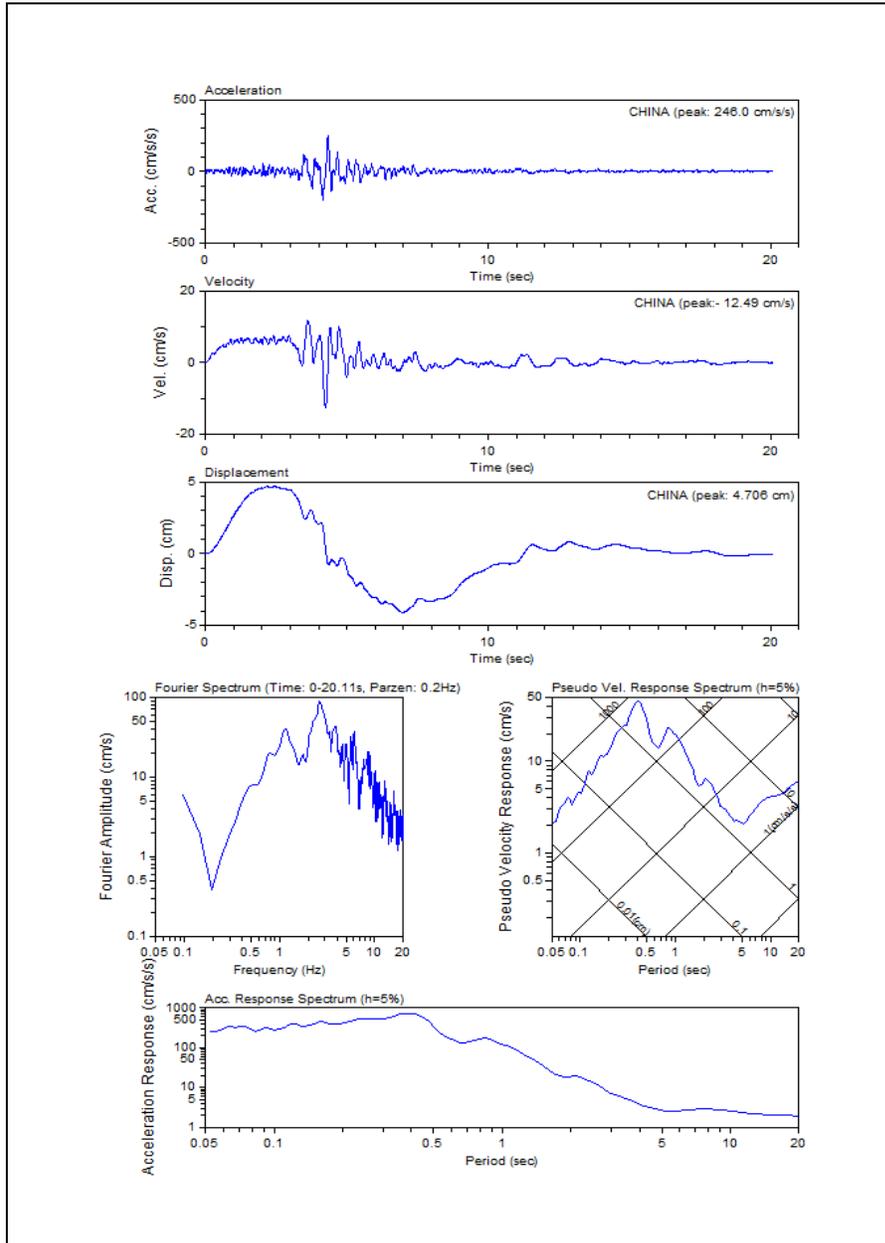
Los resultados de procesar los datos de aceleración con el programa CATFISH, desde los archivos de datos proporcionados a Quake son:

**Tabla 19. Propiedades del sismo**

Pico de aceleración	246 cm/seg <sup>2</sup>
Pico de Velocidad máxima	12.49 m/seg
Pico de máximo desplazamiento	4.706 cm
Pico Real de aceleración sin escalar	0.21895G
Tiempo de máxima aceleración	4.34 seg
Número de datos	2011
Frecuencia	200 Hz

Fuente: Autor

**Figura 56. Procesamiento de datos de acelerograma con el programa Catfish**



**Fuente:** Autor

Todos estos sismos fueron escalados a una amplitud de aceleración máxima de 0.25 g respecto de sus acelerogramas con dirección NS y EO, (el de mayor amplitud) con el fin de unificar el valor máximo de aceleración.

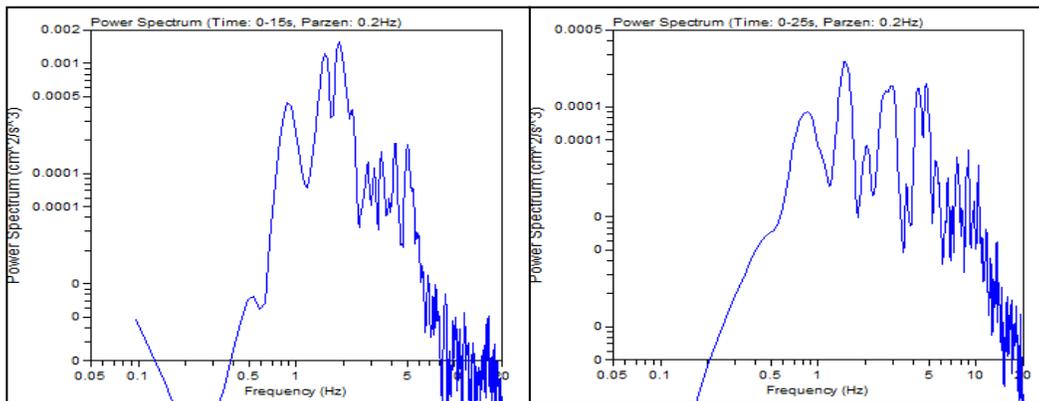
## 8.5 CONTENIDOS FRECUENCIALES<sup>8</sup>

“Los sismos tienen características especiales que son función de la fuente sismogénica que los genera, esto se ve reflejado en su duración y en su contenido frecuencial.” La variación de las frecuencias que forman parte del contenido frecuencial se determinan del análisis del espectro de potencia y los espectros de amplitudes de Fourier, de los movimientos fuertes.

**Figura 57. Espectro de potencia de los sismos**

Sismo de california

Sismo de armenia

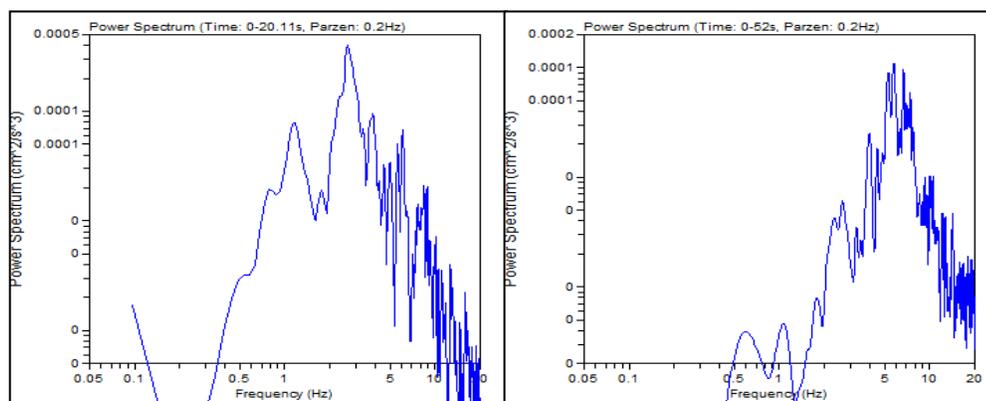


Fuente: Autor

---

<sup>8</sup> AREVALO Y ALFARO, Contenidos Frecuenciales de Sismos Colombianos registrados en BOCO y SDV (1994-1996). Bogotá 2002, pg 2

**Figura 58. Espectro de potencia de los sismos**  
 Sismo de China Sismo de Japón



Fuente: Autor

La determinación de los valores de frecuencia de esquina ( $f_c$ ) y frecuencia máxima ( $f_{max}$ ), que definen los contenidos frecuenciales de un sismo no serán calculados en este trabajo, porque no es un objetivo y no se conocen las variables para su cálculo. Sin embargo, del trabajo de la referencia 8, se puede extraer lo concerniente a sismos del sistema de fallas de romeral, (sismos de armenia son producidos por esta falla), que dan como valores los siguientes:

**Tabla 20. Contenidos frecuenciales de sismos de la falla romeral**

Tabla N° 3 CARACTERISTICAS DE LOS SISMOS DEL SISTEMA DE FALLAS DE ROMERAL														
CATALOGO	AÑO	MES	DIA	TIEMPO	COORDENADA		PROF	MAG	DISTANCIA		BOCO		SDV	
				ORIGEN	LAT	LONG			km	mb	BOCO	SDV	$f_c$	$f_{max}$
PDE	1995	1	2	223324.5	5.01	-75.42	131	4.2	160	683	0.81	8.15	1.6	8.1
PDE	1995	3	4	232340.68	1.28	-77.31	5	4.4	516	1123	0.1	8.4	0.08	8
PDE	1995	10	2	1014.02	4.07	-75.58	191	3.9	180	766	0.45	8.1	1.7	8.1
PDE	1996	8	6	170135.79	7.17	-75.26	76	4.4	317	548	0.49	7.9	0.59	8

Fuente: AREVALO Y ALFARO, Contenidos Frecuenciales de Sismos Colombianos registrados en BOCO y SDV (1994-1996). Bogotá 2002, pág. 6

Adicionalmente, podemos encontrar los valores aproximados de  $F_c$  y  $F_{max}$  de manera gráfica a partir de los espectros de potencia y de amplitud de velocidades de Fourier, para los demás sismos.

**Tabla 21. Contenidos frecuenciales de los sismos**

	<b>F<sub>c</sub></b>	<b>F<sub>max</sub></b>
<b>Sismo de Armenia</b>	0.45 Hz	7.9 - 8.4 Hz
<b>Sismo de California</b>	0.9 Hz	5 Hz
<b>Sismo de China</b>	1.2 Hz	6 Hz
<b>Sismo de Japón</b>	1.8 Hz	7 Hz

**Fuente:** Autor

## **9. ANALISIS DINAMICO DEL PERFIL DEL SUELO**

### **9.1 MODELAMIENTO EN QUAKE**

El programa QUAKE, utiliza un sistema de archivo tipo ramificación, en el que se guardan todos los procesos que el analista realiza del sitio en estudio.

En este trabajo realizaremos dos tipos de análisis, el primero será un análisis lineal elástico y el segundo un análisis lineales equivalente.

Estos últimos a su vez se dividirán en un análisis unidimensional, considerando una columna de suelo de espesor finito y un análisis bidimensional, teniendo en cuenta todo el perfil topográfico, a fin de considerar las condiciones de sitio.

En este trabajo se guardaron dos archivos el archivo “EFECTOS DEL SITIO” y el archivo “UNIDIMENSIONAL”, los cuales contienen los análisis bidimensional y unidimensional respectivamente, de los cuales se deriva cinco subarchivos, el de condiciones iniciales, en condiciones estáticas y a cero (0) segundos del sismo y otros cuatro subarchivos en condiciones de aplicación del sismo (para este caso porque son 4 sismos), con duración equivalente al acelerograma introducido.

Cada uno de estos archivos arroja resultados de presiones, esfuerzos y deformaciones. Para el caso del proceso de aplicación del sismo, los resultados antes mencionados se pueden obtener distribuidos en el tiempo.

Adicionalmente en los resultados producto del proceso de aplicación del sismo se obtienen los espectros respuesta sísmico.

- Los valores máximos de G, encontrados para este estudio, determinados por Vp, Vs y relación de poisson ( $\nu$ ), son concordantes con estudios de refracción sísmica realizados en zonas aledañas, sus resultados son los siguientes:

**Tabla 22. Valores de propiedades dinámicas usados en Quake**

MIEMBRO	Vp (m/seg)	Vs(m/seg)	**Poisson $\nu$	**Gmax (Kpa)
ORGANOS	1132	341	0.49	463.000
FINOS	1269	383	0.49	606.750
GRAVOSO	726	219	0.49	180.000
LIMOS ROJOS	1172	353	0.49	443.000

\*\* VALORES USADOS EN QUAKE

**Fuente:** Autor

## 9.2 ANALISIS LINEAL ELASTICO

En el análisis lineal elástico se introduce el Valor de G como una constante.

La información principal del análisis es: reporte original de Quake para el análisis lineal-elástico (Anexo D)

Los análisis realizados nos arrojan varios resultados, algunos de ellos son:

Aceleraciones en superficie, aceleraciones en la base, espectros de respuesta de aceleraciones, espectros de respuesta de velocidades, deformaciones o desplazamientos relativos o no relativos.

Los resultados se han presentado de tal forma que se puedan comparar los valores más importantes de uso en ingeniería, con el fin de encontrar el

comportamiento dinámico característico de los suelos de este sector de Bucaramanga.

Los resultados de los análisis realizados en Quake, con 1% de amortiguación.

**Tabla 23. Resultados del análisis lineal elástico (Unidimensional)**

ACELERACIONES PICO						PERIODO DE MAXIMA ACCELERACIÓN (Seg)	PERIODO FUNDAMENTAL DEL TERRENO (Seg)
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN		
ARMENIA	0.25	0.52	0.27	208%		0.35	2.1
CALIFORNIA	0.25	0.6	0.35	240%		0.51	2.1
JAPON	0.25	0.10	-0.15		60%	0.18	2.1
CHINA	0.25	0.46	0.21	84%		0.38	2.1
							Vs(prom)=324 m/seg

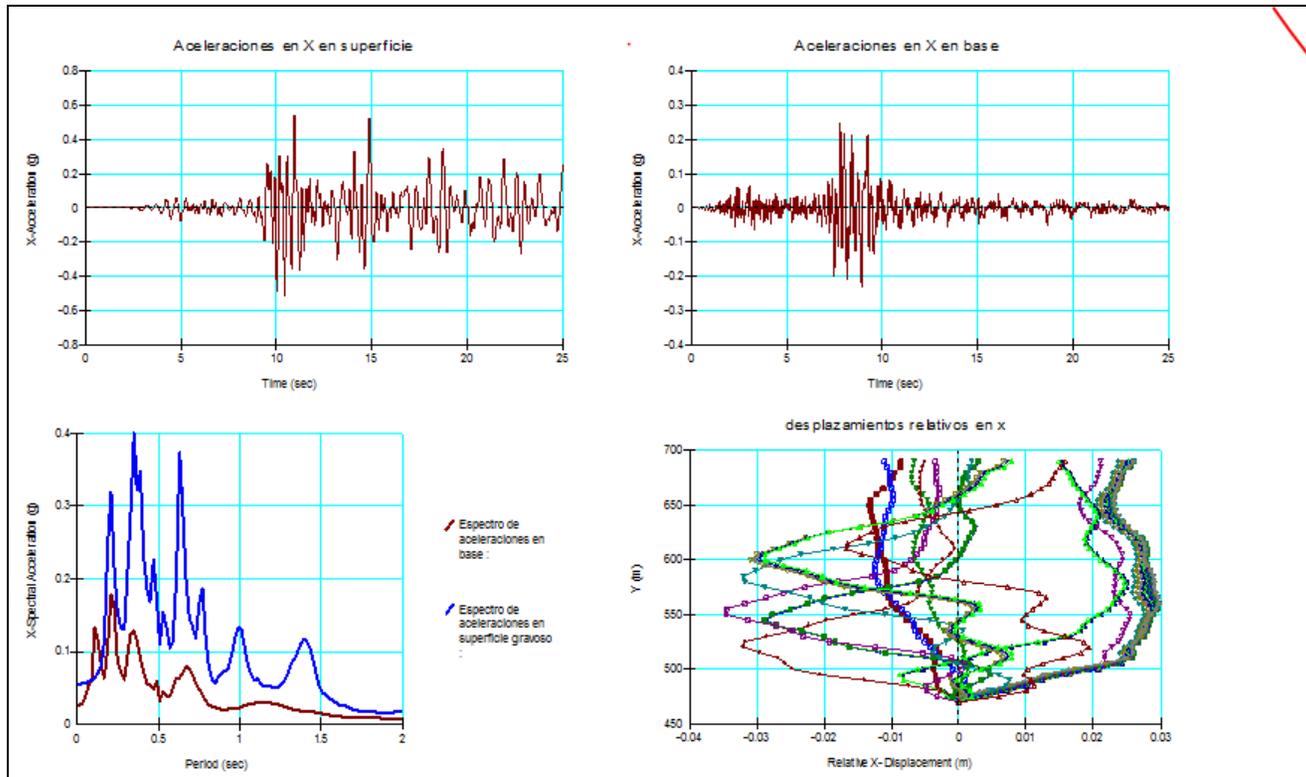
ACELERACIONES PICO						PERIODO DE MAXIMA ACCELERACIÓN (Seg)	PERIODO FUNDAMENTAL DEL TERRENO (Seg)
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN		
ARMENIA	0.25	0.72	0.47	188%		0.32	2.1
CALIFORNIA	0.25	0.58	0.33	132%		0.5	2.1
JAPON	0.25	0.175	-0.075		30%	0.18	2.1
CHINA	0.25	0.34	0.09	36%		0.38	2.1
							Vs(prom)=324 m/seg

Fuente: Autores

Las gráficas producto de los análisis se muestran a continuación, para los cuatro sismos introducidos.

### 9.2.1 Sismo de armenia (unidimensional)

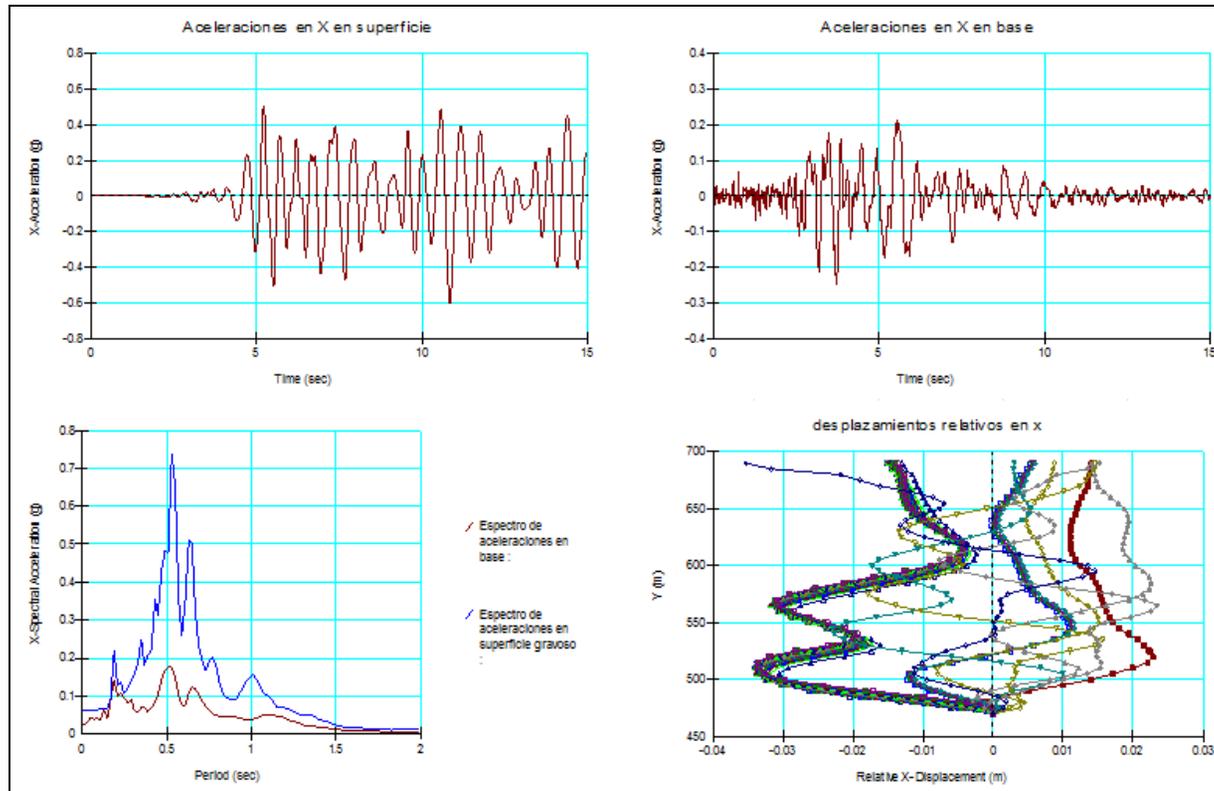
Figura 59. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

### 9.2.2 Sismo de california (unidimensional)

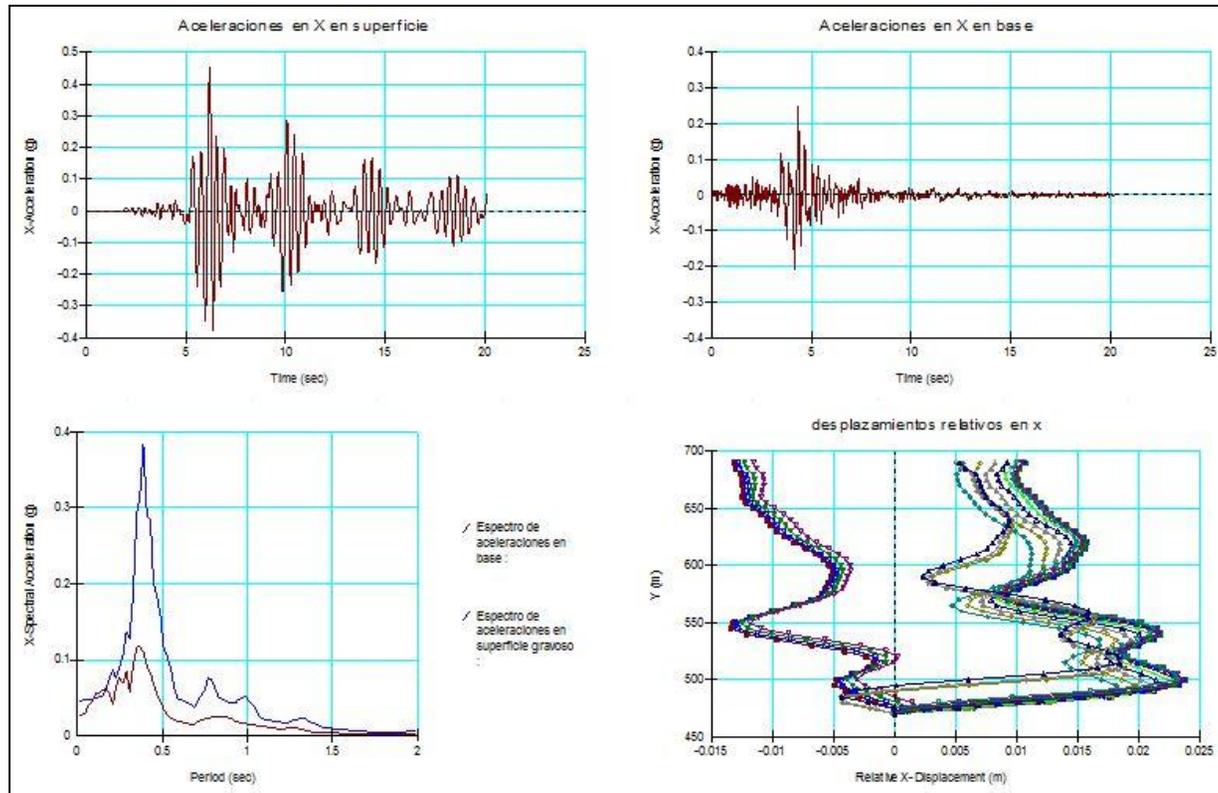
Figura 60. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

### 9.2.3 Sismo de china (unidimensional)

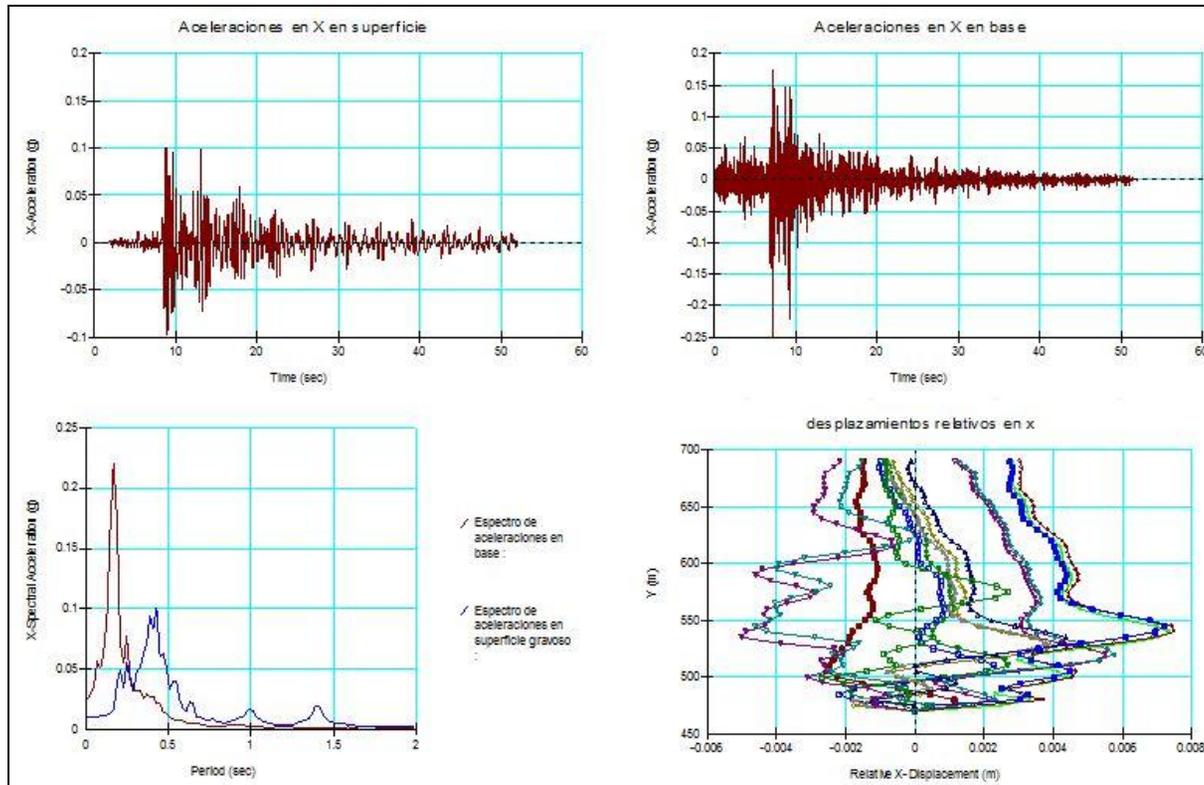
Figura 61. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

### 9.2.4 Sismo de Japón (unidimensional)

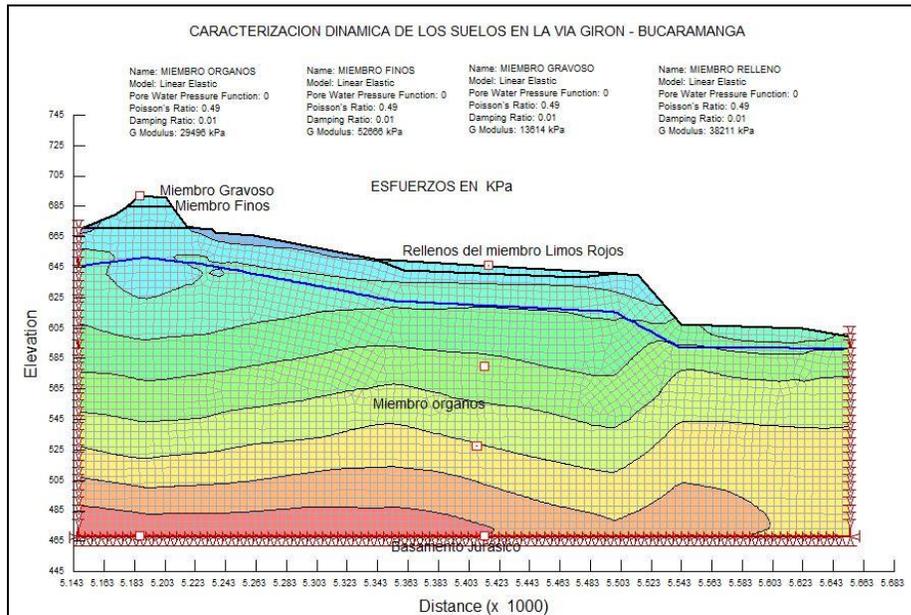
Figura 62. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

### 9.3 ANALISIS BIDIMENSIONAL - LINEAL ELÁSTICO

**Figura 63. Presiones efectivas en el terreno**

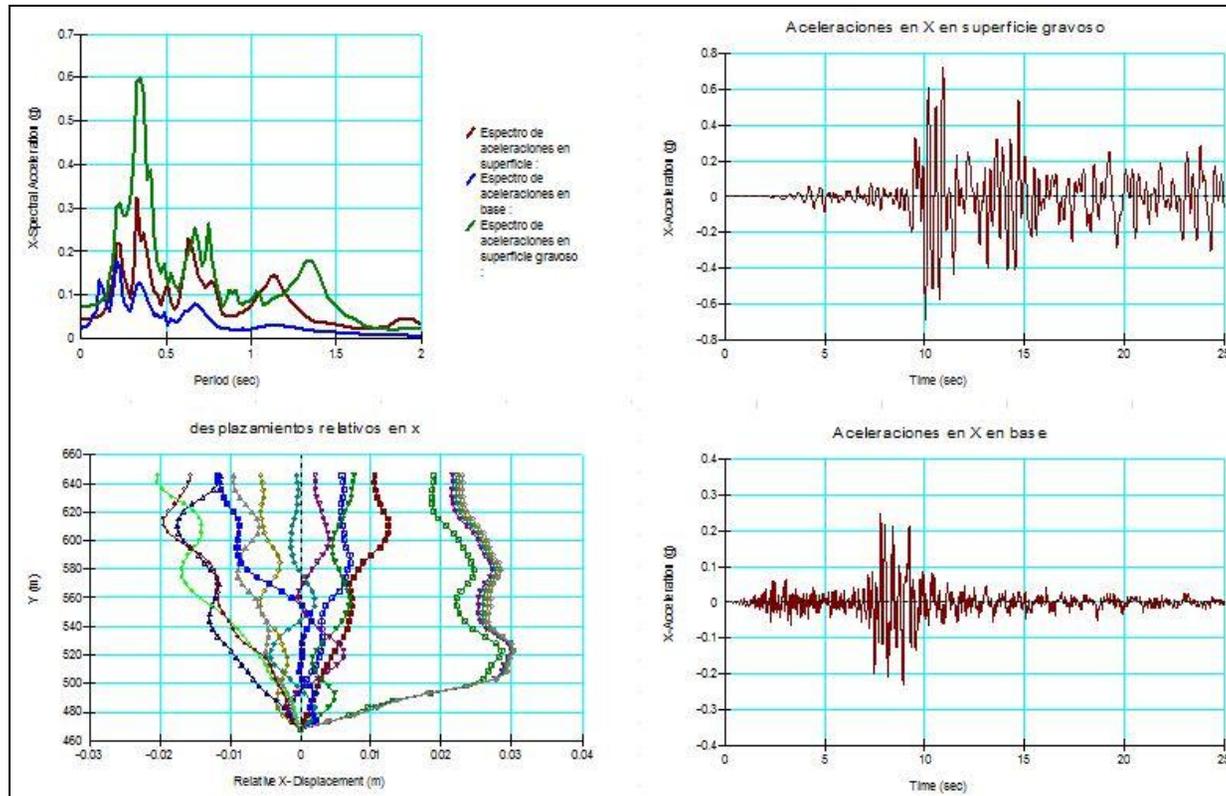


Fuente: Autor

En el análisis bidimensional, se incluye el perfil del terreno basado en la topografía, al igual que en el análisis unidimensional, se colocan algunos puntos de control llamados "History Points", con el fin de encontrar valores de cada análisis en el mismo punto y establecer comparación entre estos resultados.

### 9.3.1 Sismo de Armenia (Bidimensional)

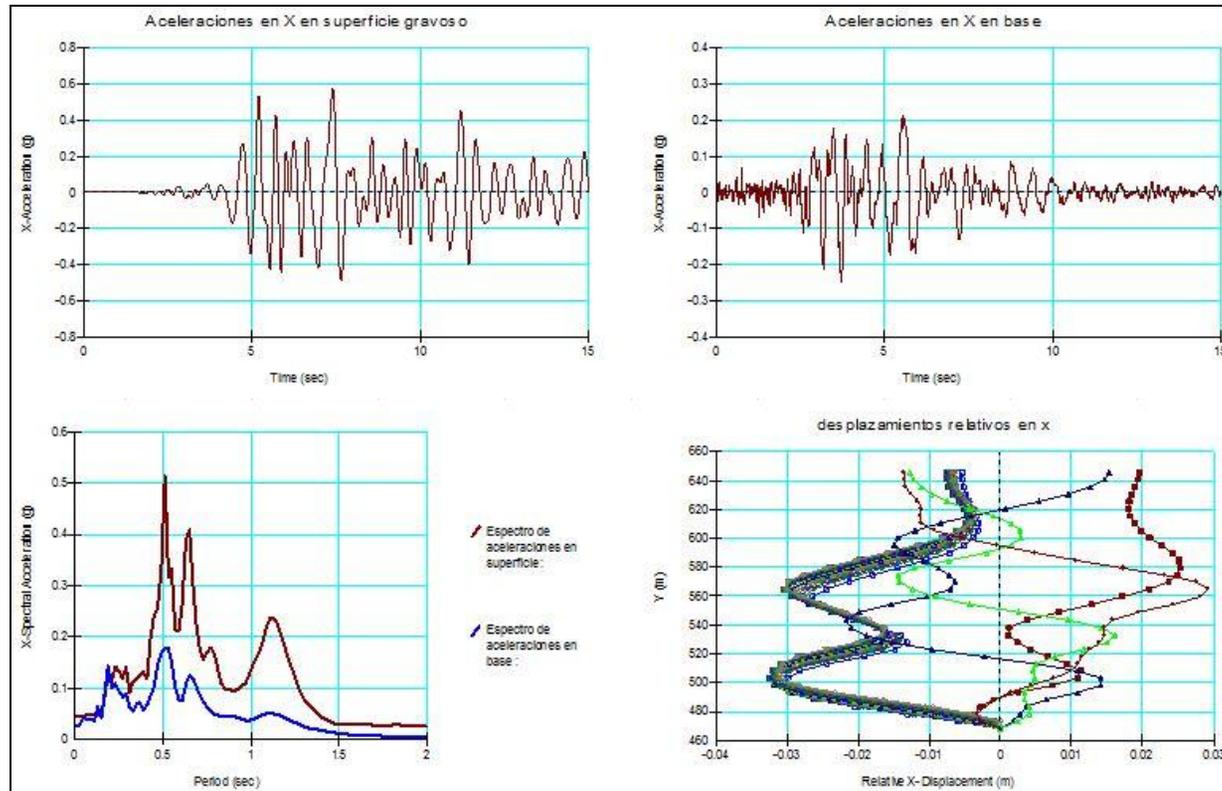
Figura 64. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

### 9.3.2 Sismo de california (Bidimensional)

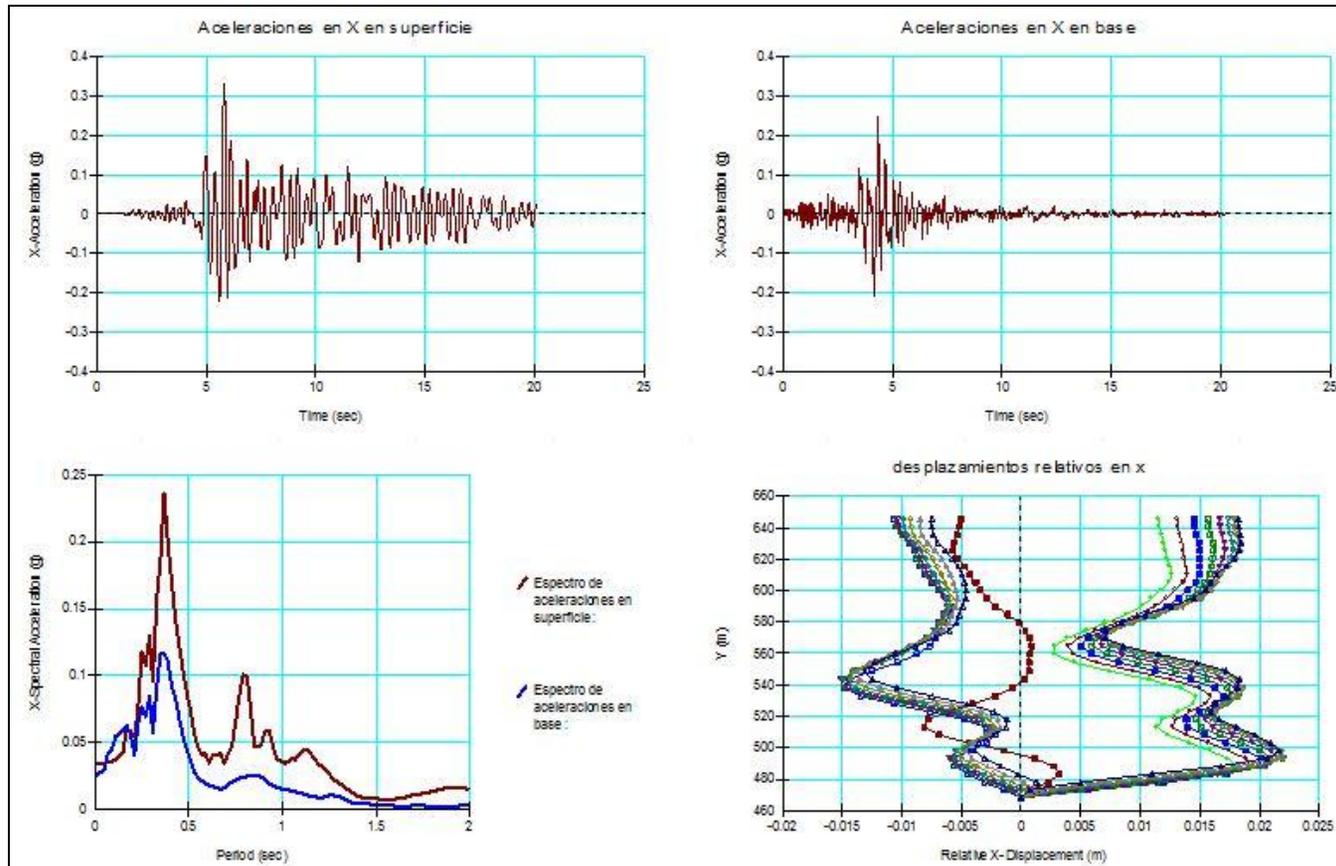
Figura 65. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

### 9.3.3 Sismo de china (Bidimensional)

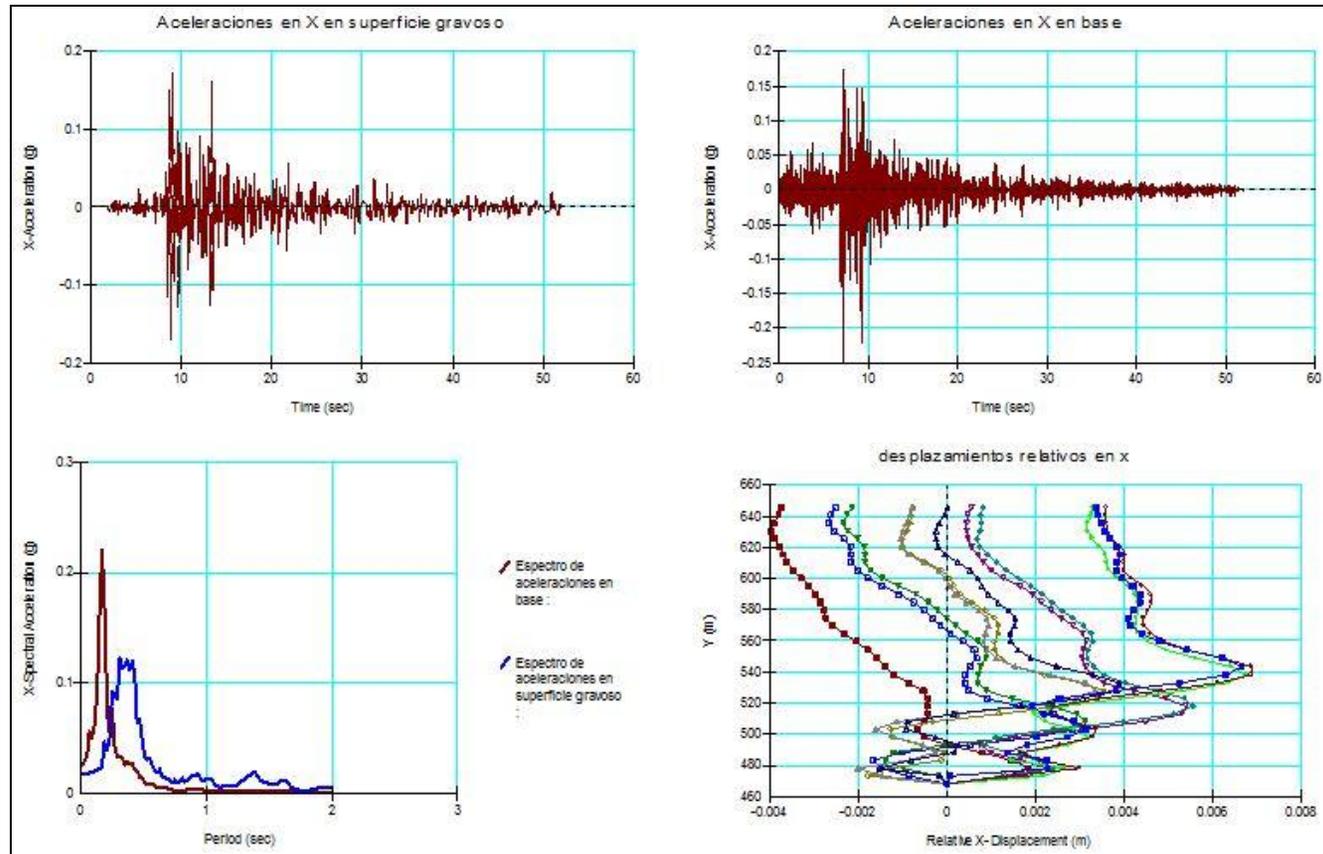
Figura 66. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

### 9.3.4 Sismo del Japón (Bidimensional)

Figura 67. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

El análisis de los resultados producto de usar una columna unidimensional y un perfil bidimensional, nos muestra que existe una pequeña variación en los resultados, con una ligera amplificación de las aceleraciones respecto del análisis unidimensional; esto se explica porque una columna de suelo unidimensional es la representación de un estrato horizontal, isotrópico y homogéneo del suelo, lo que confirma la influencia de la topografía en la amplificación.

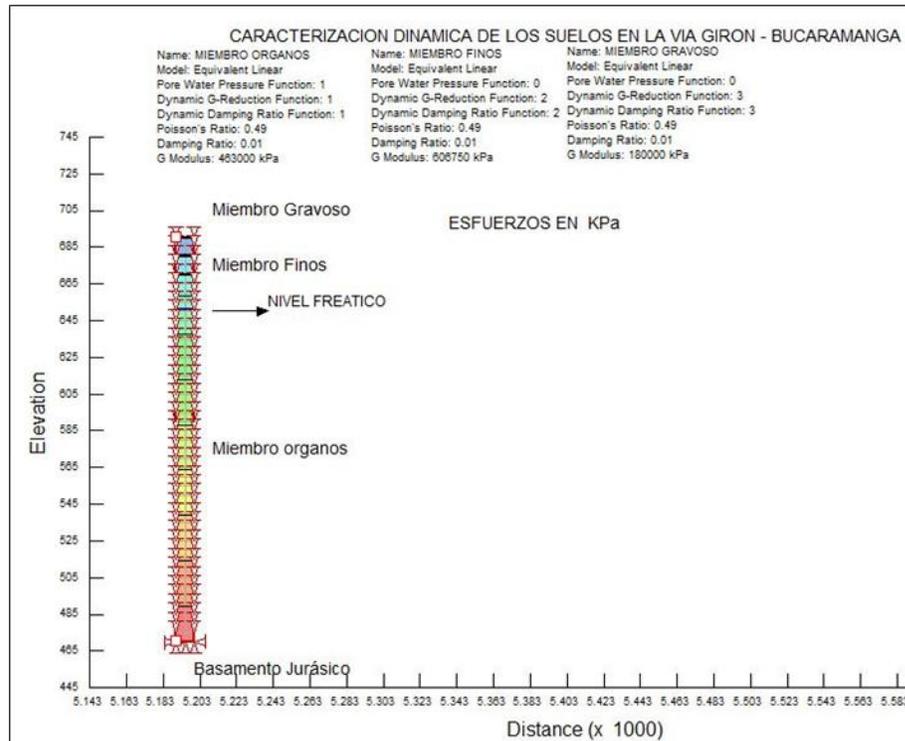
**Tabla 24. Resumen de resultados obtenidos de los sismos (lineal elástico bidimensional) Amortiguación 1%**

ACELERACIONES PICO						PERIODO DE MAXIMA ACELERACIÓN (Seg)	PERIODO FUNDAMENTAL DEL TERRENO (Seg)
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN		
ARMENIA	0.25	0.72	0.47	188%		0.35	2.1
CALIFORNIA	0.25	0.58	0.33	132%		0.51	2.1
JAPON	0.25	0.175	-0.075		30%	0.18	2.1
CHINA	0.25	0.34	0.09	36%		0.38	2.1
							Vs(prom)=324 m/seg
ACELERACIONES MAXIMAS ESPECTRALES							
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN	DEFORMACIONES MAXIMAS EN X	
ARMENIA	0.18	0.6	0.42	233%		50 mm	
CALIFORNIA	0.175	0.52	0.345	197%		60 mm	
JAPON	0.22	0.13	-0.09		41%	11 mm	
CHINA	0.12	0.235	0.115	96%		35 mm	

Fuente: Autor

## 9.4 ANALISIS LINEAL EQUIVALENTE

Figura 68. Analisis lineal - equivalente unidimensional



Fuente: Autor

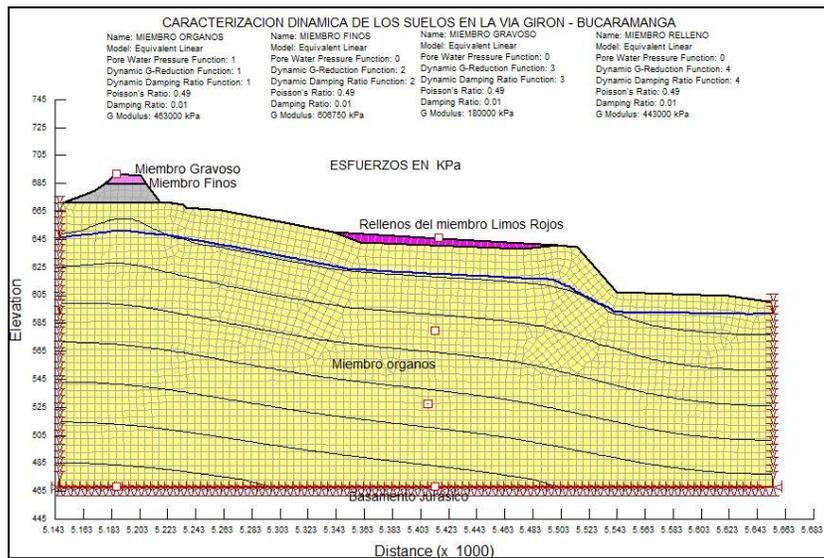
### 9.4.1 Análisis bidimensional

#### CONDICION INICAL

En este proceso las condiciones del perfil del suelo son estáticas y la definición de variables es simple, pero se debe incluir la forma como se valorará la presión de poros (PWP –pore water pressure). En este caso, la definimos como tabla de agua. También se definieron las funciones del módulo cortante y de amortiguación.

El análisis en el programa arrojó los siguientes resultados para la condición estática.

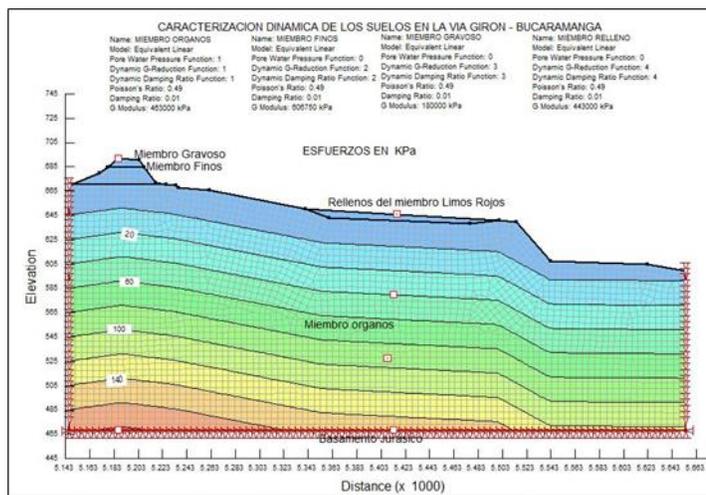
**Figura 69. Perfil Bidimensional**



Fuente: Autor

La corrida del programa en condición estática sin aplicación del sismo nos muestra el siguiente estado de presión de poros

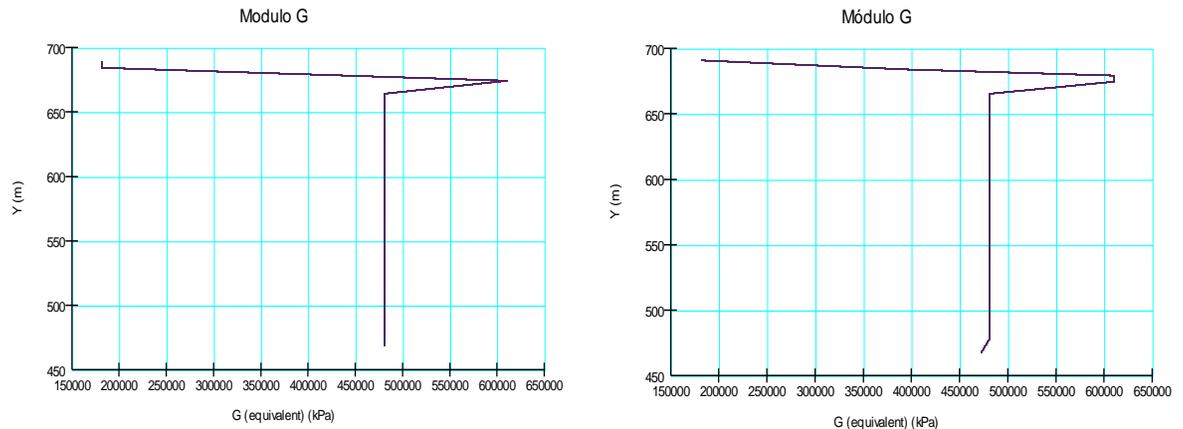
**Figura 70. Estado de presión de poros**



Fuente: Autor

El análisis de variación del módulo cortante se puede observar en la siguiente gráfica.

**Figura 71. Variación del módulo cortante**



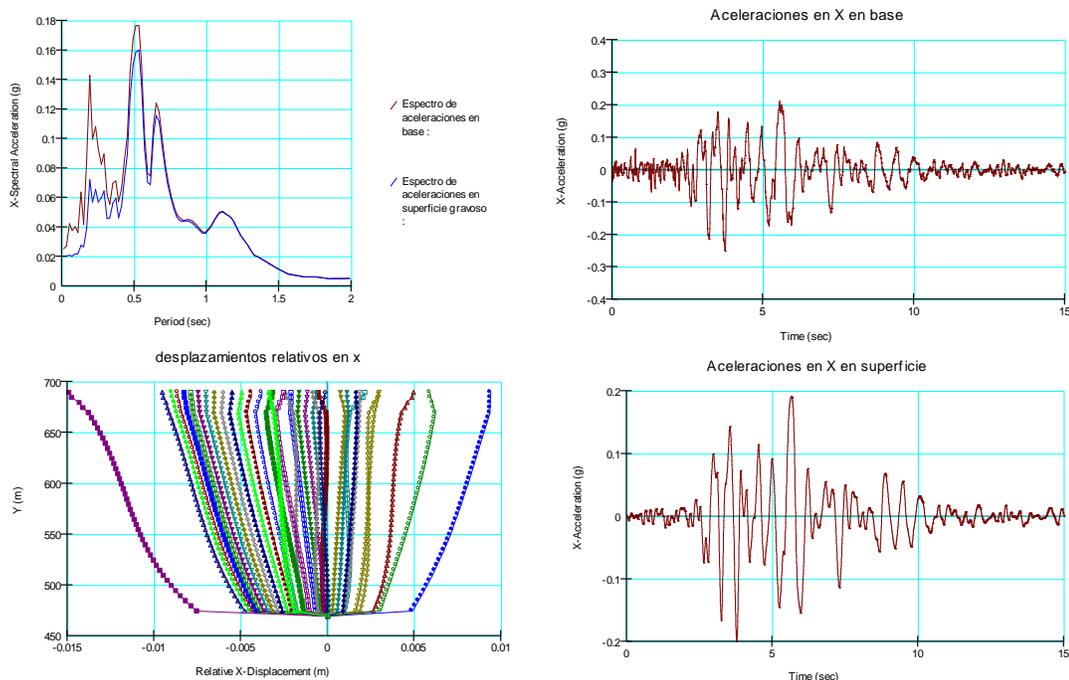
Fuente: Autor

La primera y segunda grafica representa la variación del módulo cortante máximo para cada uno de los análisis unidimensional y bidimensional respectivamente, con la aplicación del sismo de Armenia. No se observa cambios sustanciales en los valores del módulo, lo que significa que él se mantiene constante. En principio esta es una condición dada, debido que no se conoce el aumento del valor de G con la profundidad, pero si se introdujo un valor de reducción, el cual no afectó de manera alguna los valores del módulo, y esto es explicable cuando observemos las deformaciones máximas relativas encontradas, por lo que se concluye que estas son muy bajas y no afectan significativamente el valor de G.

Los resultados obtenidos en los análisis dinámicos para la columna de suelo unidimensional son:

Con el sismo de Armenia

**Figura 72. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos**



Fuente: Autor

La interpretación de los resultados nos muestra que las aceleraciones en la base, definidas por el acelerograma introducido son coincidentes, pero las aceleraciones esperadas en superficie son menores, lo que sugiere que existe una ligera atenuación de la aceleración. También esto se puede observar con la grafica de espectro de aceleraciones, que muestra una aceleración máxima mayor para la base. En esta gráfica también se puede concluir lo expresado en página anterior, relacionado con el valor del módulo G, pues los valores de deformación en X obtenidos durante el movimiento, son del orden de 1 y 1,5 cm, que podría traducirse en una variación angular del orden de  $9e-3\%$ . Esto implica un valor de módulo relativamente alto.

El análisis bidimensional fue más exhaustivo. Los resultados obtenidos del análisis bidimensional, teniendo en cuenta el perfil (condiciones locales), arrojó los siguientes resultados.

Los sismos de Armenia, California, Japón y China, presentan periodos máximos de vibración entre 0.1 y 0.6 seg.

Para el análisis Lineal – Equivalente, se tiene

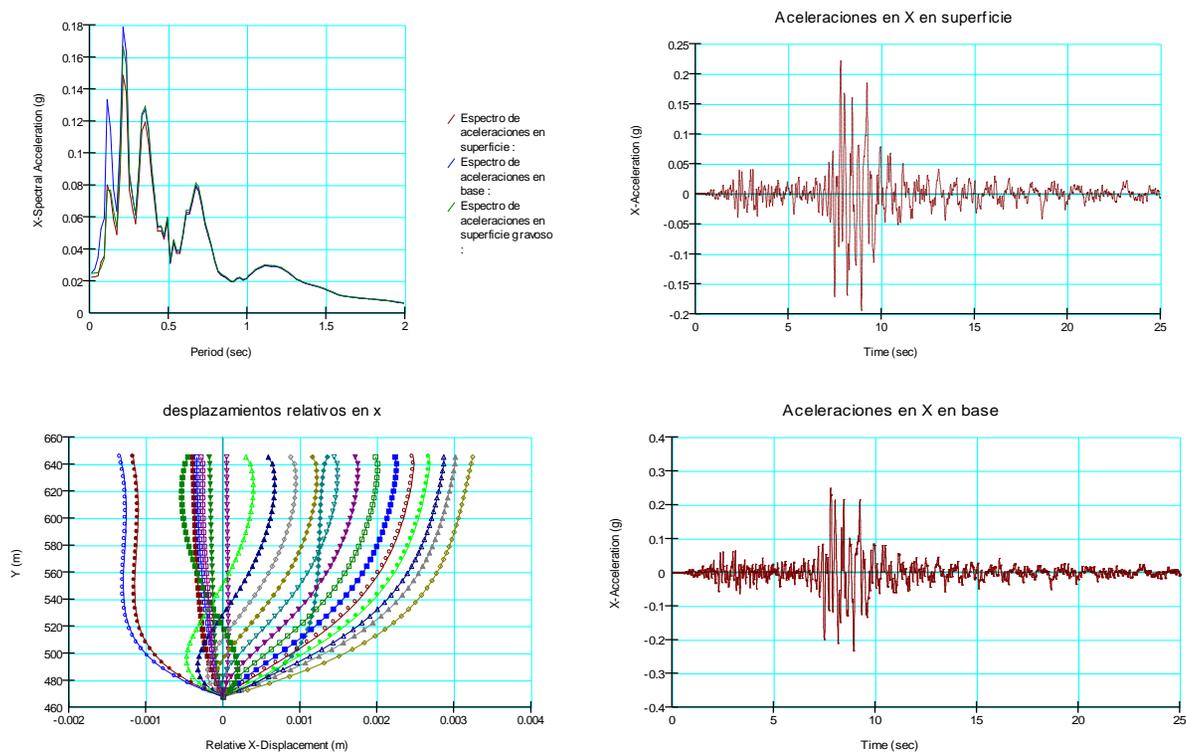
**Tabla 25. Resumen de resultados obtenidos de los sismos (lineal equivalente)**

ACELERACIONES PICO (g)						PERIODO DE MAXIMA ACELERACIÓN (Seg)	PERIODO FUNDAMENTAL DEL TERRENO (Seg)
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN		
ARMENIA	0.25	0.22	-0.03		-12%	0.22	2.1
CALIFORNIA	0.25	0.22	-0.03		-12%	0.55	2.1
JAPON	0.25	0.14	-0.11		-44%	0.18	2.1
CHINA	0.25	0.23	-0.02		-8%	0.32	2.1
							Vs(prom)=324 m/seg
ACELERACIONES MAXIMAS ESPECTRALES (g)							
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN	DEFORMACIONES MAXIMAS EN X	
ARMENIA	0.18	0.17	-0.01		-6%	5 mm	
CALIFORNIA	0.18	0.165	-0.015		-8%	10 mm	
JAPON	0.22	0.165	-0.055		-25%	1 mm	
CHINA	0.116	0.11	-0.006		-5%	6 mm	

Fuente: Autor

Del sismo de armenia

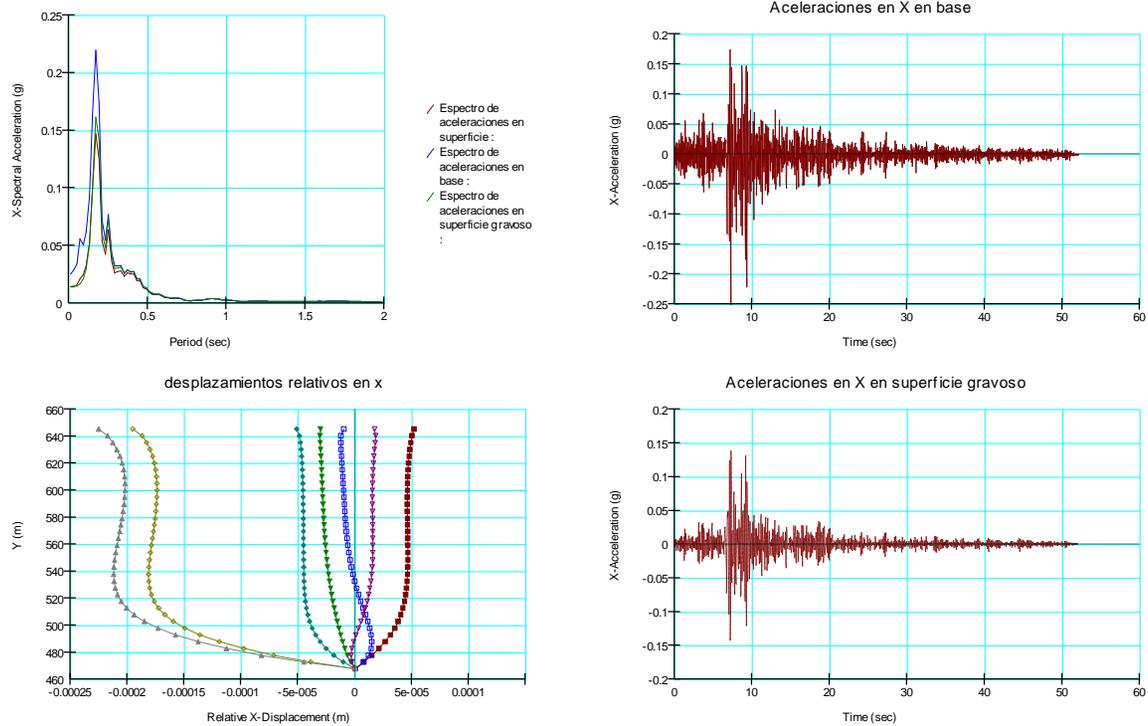
**Figura 73. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos**



Fuente: Autor

Del sismo de Japón

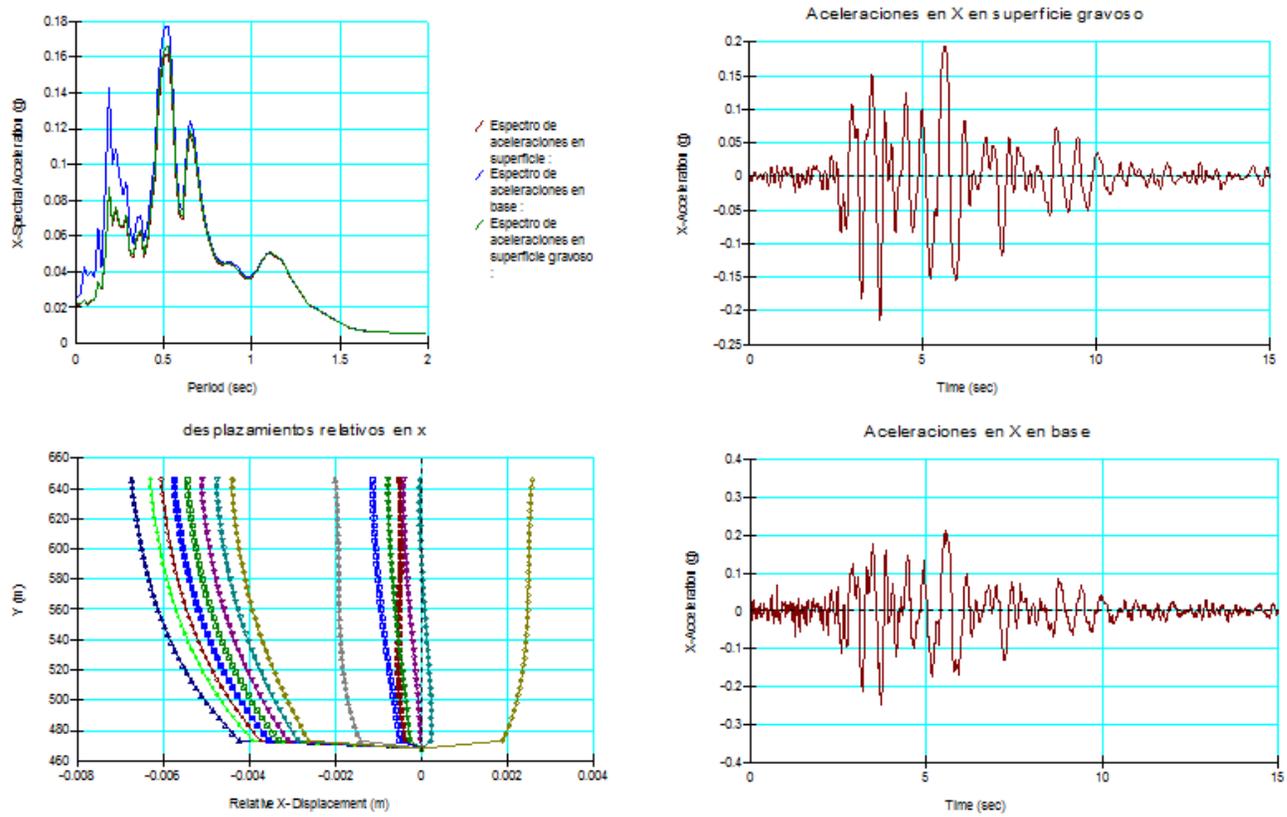
**Figura 74. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos**



Fuente: Autor

Del sismo de california

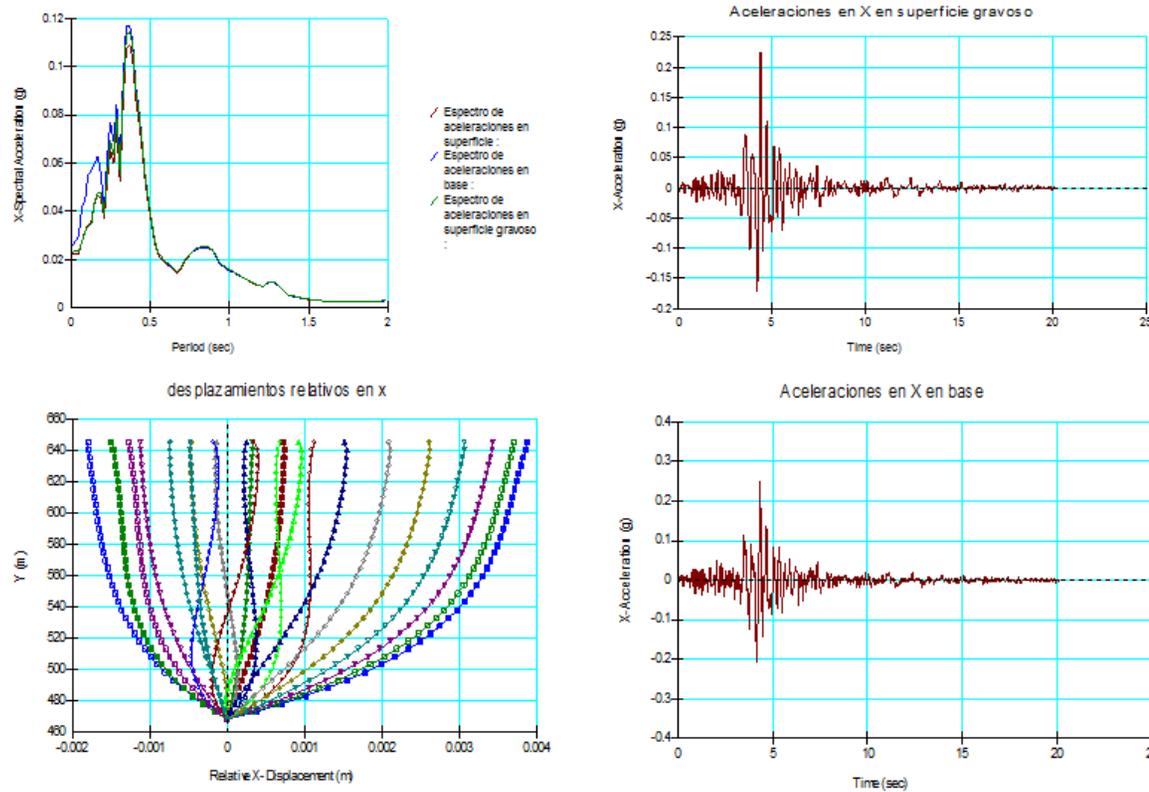
**Figura 75. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos**



Fuente: Autor

El sismo de china

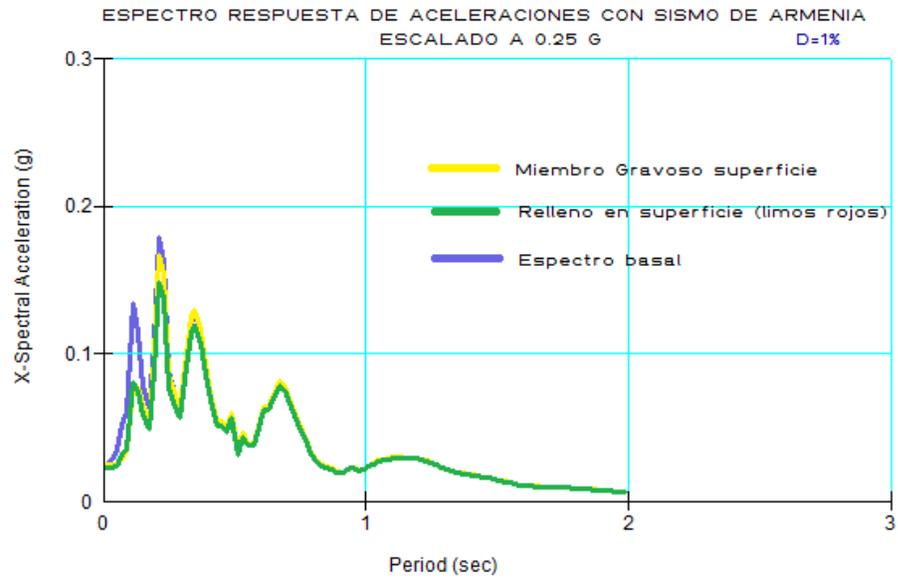
Figura 76. Resultados de aceleraciones, espectros de respuesta y desplazamientos



Fuente: Autor

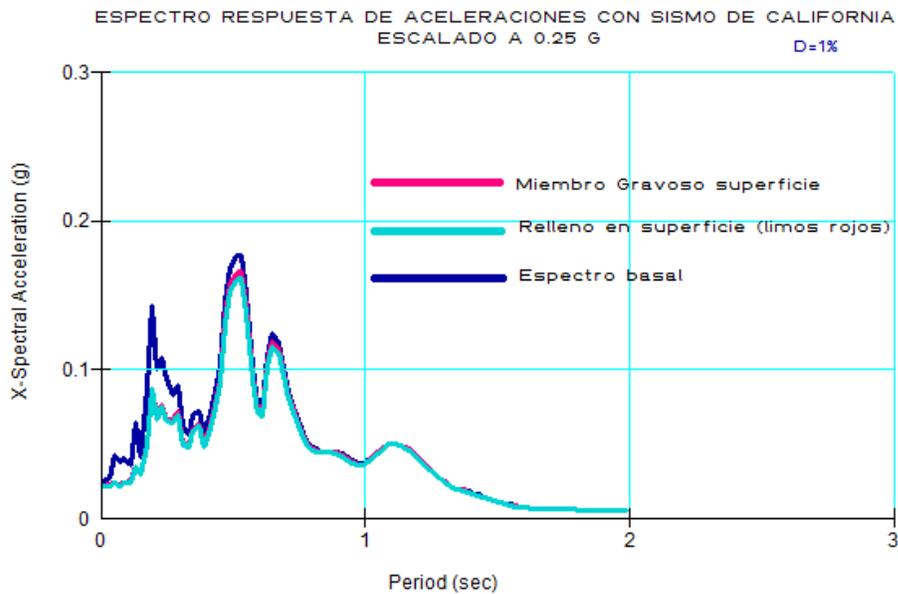
## 9.5 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DINÁMICA (ESPECTROS DE RESPUESTA)

Figura 77. Espectro respuesta de aceleraciones con sismo de Armenia



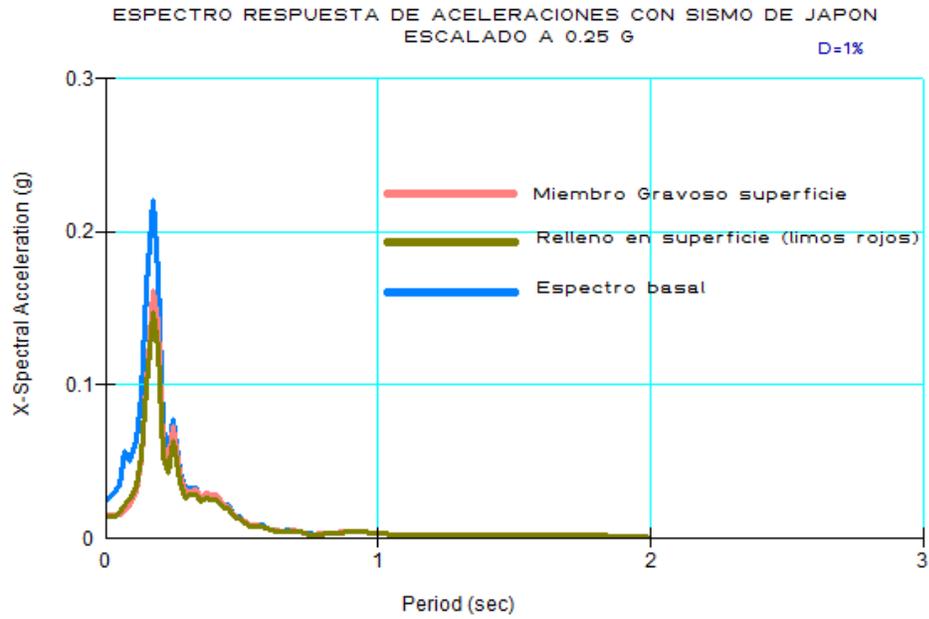
Fuente: Autor

Figura 78. Espectro respuesta de aceleraciones sismo de california



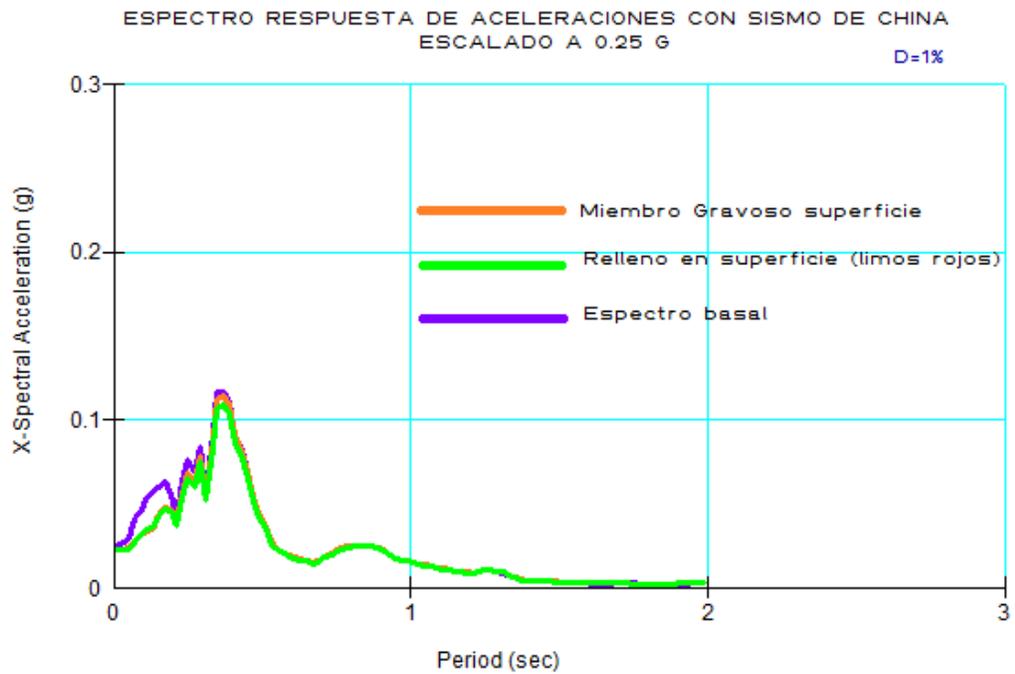
Fuente: Autor

**Figura 79. Espectro respuesta de aceleraciones con sismo de Japón**



Fuente: Autor

**Figura 80. Espectro respuesta de aceleraciones con sismo de China**



Fuente: Autor

Los resultados de la evaluación dinámica basados en análisis lineal equivalente son los siguientes:

**Tabla 26. Comparación de resultados**

ACELERACIONES PICO						PERIODO DE MAXIMA ACCELERACIÓN (Seg)	PERIODO FUNDAMENTAL DEL TERRENO (Seg)
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN		
ARMENIA	0.25	0.22	-0.03		-12%	0.22	2.1
CALIFORNIA	0.25	0.22	-0.03		-12%	0.55	2.1
JAPON	0.25	0.14	-0.11		-44%	0.18	2.1
CHINA	0.25	0.23	-0.02		-8%	0.32	2.1
							Vs(prom)=324 m/seg
ACELERACIONES MAXIMAS ESPECTRALES							
SISMOS	BASE JURASICO	SUPERFICIE	DEIFERENCIA	AMPLIFICACION	ATENUACIÓN	DEFORMACIONES MAXIMAS EN X	
ARMENIA	0.18	0.17	-0.01		-6%	5 mm	
CALIFORNIA	0.18	0.165	-0.015		-8%	10 mm	
JAPON	0.22	0.165	-0.055		-25%	1 mm	
CHINA	0.116	0.11	-0.006		-5%	6 mm	

**Fuente:** Autor

Los valores encontrados producto de la evaluación dinámica nos permite concluir que en el sector en estudio no se produce amplificación por efectos locales, por el contrario existe una atenuación o de amplificación significativa de un 8 a 25 %.

## 10. ENSAYO DE CRISTALOGRAFIA (por difracción de rayos x)

Con el fin de conocer la composición mineralógica de los miembros principales de la formación Bucaramanga, se determino realizar tres ensayos de cristalografía. Estos tienen como meta medir de manera cualitativa los componentes cristalinos más importantes de los suelos que componen la formación; el objetivo es, poder establecer los principales materiales que conforman los miembros de la formación Bucaramanga.

### Preparación y montaje de las muestras

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38  $\mu$ m (400 mesh). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un porta muestra aluminio mediante técnica de llenado frontal

### Toma de datos de difracción

Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:

Voltaje	40(Kv)
Corriente	30(mA )
Rendija de Divergencia	0.6 mm
Rendijas Soller Primario	2,5°
Muestreo	0.01526°2theta
Rango de Medición	3.5-70° 2theta
Radiación	CuK $\alpha$ 1
Filtro	Niquel
Detector	Linea LynxEye
Tipo de barrido	A pasos
Tiempo de muestreo	0.4 segundos

Tipo de Análisis

Análisis Cualitativo

El análisis cualitativo de las frases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre For Diffraction Data( ICDD)

Información suministrada por el cliente

Análisis elemental : No

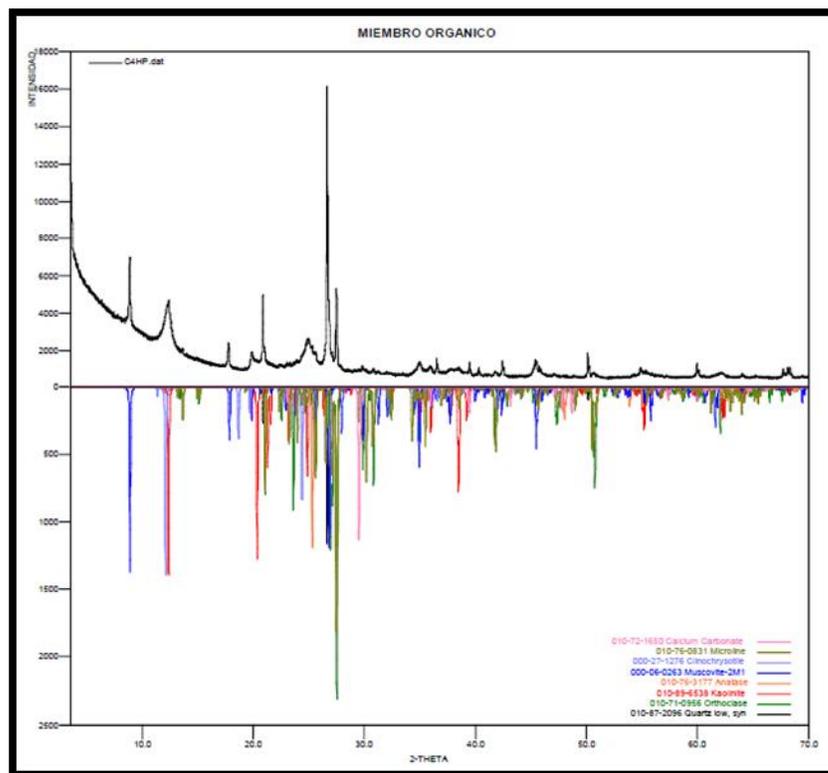
Interés por alguna(s) fase(s) en particular: identificación de fases cristalinas

**Tabla 27. Caracterización cristalográfica del miembro órganos**

<b>2. MIEMBRO ORGANO (C4HP)</b>			
	<b>FASE</b>	<b>No TARJETA PDF-2</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>CRISTALINOS</b>	SiO <sub>2</sub>	010-87-2096	Cuarzo
	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	000-12-0703	Ortoclaza
	TiO <sub>2</sub>	010-76-3177	Anatasa
	K <sub>0,94</sub> Na <sub>0,06</sub> Al <sub>1,01</sub> Si <sub>2,99</sub> O <sub>8</sub>	010-76-0831	Microclina
	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-89-6538	Caolinita
	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	000-27-1276	Clinocrisotilo
	K(Al <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>9</sub> (OH) <sub>3</sub> )	000-06-0263	Moscovita
	CaCO <sub>3</sub>	010-72-1650	Calcita

Fuente: Laboratorio UIS

Figura 81. Caracterización cristalográfica del miembro órganos



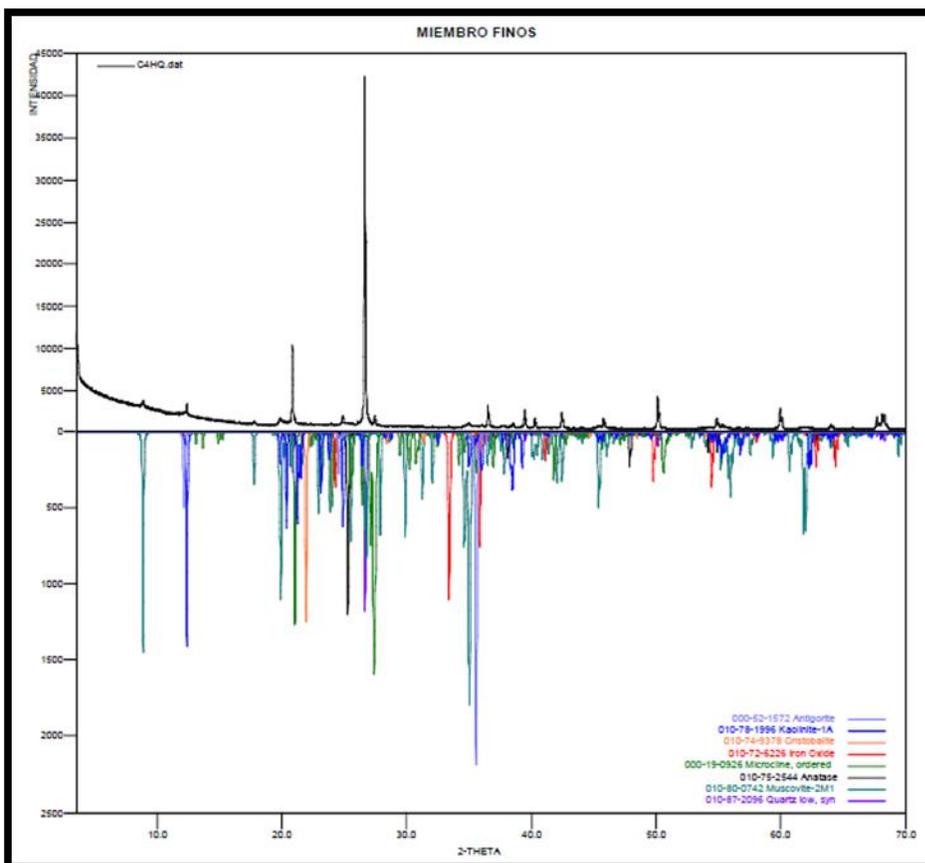
Fuente: Laboratorio UIS

Tabla 28. Caracterización cristalográfica miembros finos

3. MIEMBROS FINOS (C4HQ)			
FASE		No TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	SiO <sub>2</sub>	010-87-2096	Cuarzo
	SiO <sub>2</sub>	010-74-9378	Cristobalita
	TiO <sub>2</sub>	010-75-2544	Anatasa
	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	000-19-0926	Microclina
	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-78-1996	Caolinita
	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	000-52-1572	Antigorita
	(K <sub>0.82</sub> Na <sub>0.18</sub> )(Fe <sub>0.3</sub> Al <sub>1.97</sub> )(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-80-0742	Moscovita
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	010-72-6226	Hematita

Fuente: Laboratorio UIS

**Figura 82. Caracterización cristalográfica miembros finos**



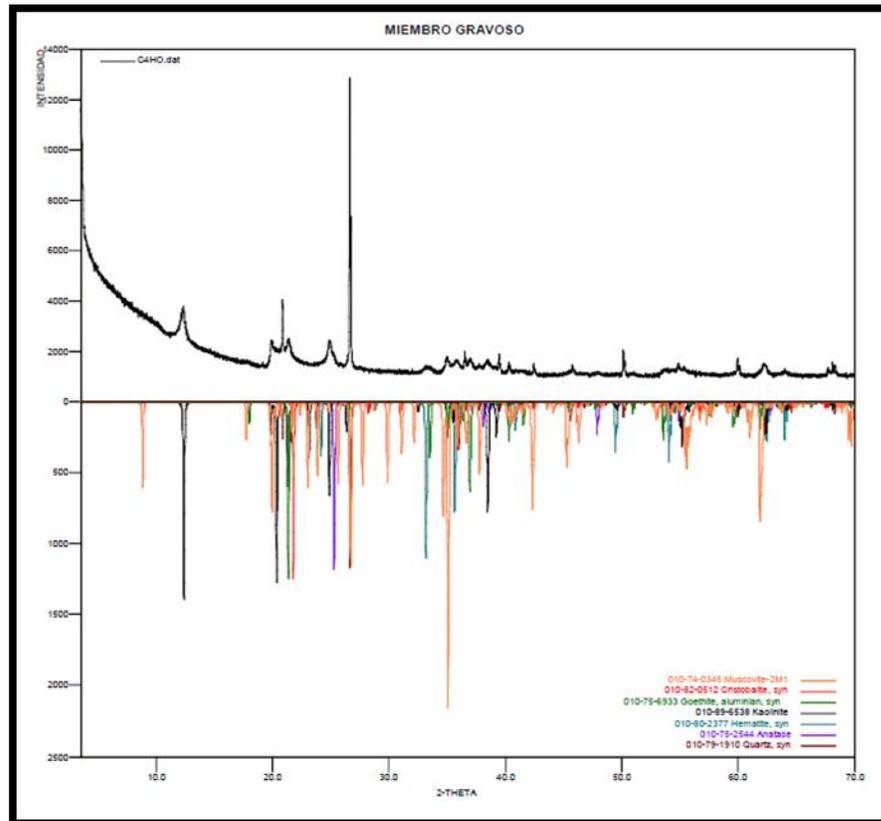
Fuente: Laboratorio UIS

**Tabla 29. Caracterización cristalográfica miembros gravoso**

1. MIEMBRO GRAVOSO (C4H0)			
FASE		No TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	SiO <sub>2</sub>	010-79-1910	Cuarzo
	(Fe <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> )O (OH)	010-75-6933	Goetita
	TiO <sub>2</sub>	010-75-2544	anatasa
	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (OH) <sub>4</sub>	010-89-6538	Caolinita
	K(Al <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>9</sub> (OH) <sub>3</sub> )	010-74-0345	Moscovita
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	010-80-2377	Hematita
	SiO <sub>2</sub>	010-82-0512	Cristobalita

Fuente: Laboratorio UIS

**Figura 83. Caracterización cristalográfica miembros gravoso**



Fuente: Laboratorio UIS

#### Observaciones

- Se recomienda realizar análisis elemental para corroborar la presencia de las fases reportadas.

En los perfiles de difracción de las muestras recibidas en el laboratorio, se observaron señales características del grupo de las micas: Después de realizar un pre tratamiento a cada una de las muestras, se pudo determinar que la fase cristalina más probable es la Muscovita

## 11. CONCLUSIONES

El perfil del suelo del sector estudiado, ubicado entre la vía transversal metropolitana y la autopista Bucaramanga –Girón, tiene una extensión de aproximadamente 6 ha, corresponde casi en su totalidad al miembro órganos, el cual tiene una profundidad de 170 m en el sitio de estudio. Los otros miembros, tienen en su orden 15 m para los finos y 10 m para el gravoso. Los rellenos de limos rojos tienen 4 m de espesor. El nivel freático se encuentra a 15 m de profundidad.

- Los valores de módulos cortante encontrado después de realizar varios cálculos y análisis de sensibilidad son variables entre un rango de 15.000 Kpa y 56.000 Kpa, para deformaciones del orden de 0.1 y 1%.

RESULTADOS	$\sigma_3$ (Kpa)	Gprom KPa	$\xi_{prom}$ %	Vp (m/seg)	**Poisson u	Gmax (Kpa)
Miembro Órganos	22.6	29.490	8.9	1132	0.49	463,106
Miembro Finos	52	54.825	7.2	1269	0.49	606,749
Miembro Gravoso	20.6	13.610	7.3	726	0.49	180,049
Miembro Limos Rojos	20.6	38.210	6.7	1172	0.49	443,603

- No se observan variaciones del valor del módulo cortante ( G ), durante la aplicación de los sismos en el programa, esto se explica por las bajas deformaciones que se presentan dentro del suelo, que a su vez son producto de un valor alto de G inicial.

- La relación de amortiguación ( $\xi$ ), podemos concluir que esta no es clara, ni se ajusta a los parámetros teóricos definidos por Ishibashi y Zhang (1.993), la razón estriba fundamentalmente, en el comportamiento rígido del suelo, incapaz de soportar tensiones o esfuerzos de tracción, según lo observado en las curvas histeréticas de cada ensayo triaxial; por lo tanto, en el momento de hacer la evaluación dinámica se estableció un valor de amortiguación de 1%.
- Los Sismos de análisis introducidos en este trabajo, corresponden a sismos acontecidos en otra latitudes, los cuales fueron seleccionados por tener valores diversos en sus contenidos frecuenciales. Estos sismos y sus contenidos frecuenciales son:

	<b>F<sub>c</sub></b>	<b>F<sub>max</sub></b>
<b>Sismo de Armenia</b>	0.45 Hz	7.9 - 8.4 Hz
<b>Sismo de California</b>	0.9 Hz	5 Hz
<b>Sismo de China</b>	1.2 Hz	6 Hz
<b>Sismo de Japón</b>	1.8 Hz	7 Hz

Del análisis Lineal – Equivalente se concluyó

- Los espectros de aceleración encontrados de los sismos de Armenia y California, tienen alguna similitud entre ellos, lo mismo ocurre para los sismos de China y Japón.
- Los efectos locales o de sitio, de los sismos analizados no producen amplificación de la aceleración, por el contrario producen deamplificación, en valores de 8 al 25%., esto es explicado por los valores altos del módulo cortante.

- Los resultados obtenidos demuestran una gran resistencia al corte (basados en los módulos cortante obtenidos), esto permite concluir, por qué sobre esta vía se realizan cortes de talud completamente verticales en alturas que superan los 20 m sin problemas de estabilidad.

Para el análisis Lineal – Elástico, se tiene:

- Este análisis se realizó con el fin de conocer las respuestas del suelo cuando el parámetro de resistencia cortante y amortiguación son constantes.

Es así que dentro de los resultados obtenidos se encuentran las siguientes conclusiones:

- Existe una amplificación notable de las aceleraciones espectrales en superficie respecto de la base, lo que denota una amplificación del orden de 95% al 233%, para los sismos de Armenia, California y China, pero contrario se presenta para el sismo del Japón, en el cual se presenta una deamplificación del 40%. Cálculos con amortiguación igual a 1%. Estos resultados son mucho más conservadores que los del análisis lineal-equivalente.
- Los resultados obtenidos nos muestran que las aceleraciones de respuesta esperadas en la superficie no superan 0.6g con amortiguación del 1%. Con amortiguaciones superiores se espera un menor valor de aceleración, lo que nos lleva a concluir que es necesario estudiar más el tema de la dinámica en los suelos de Santander.
- La resistencia alta de los suelos que conforman la formación Bucaramanga también se debe en gran medida a la composición mineralógica de sus partículas, las que de acuerdo con los ensayos de difracción de rayos X,

establece la presencia destacada de minerales de cuarzo, hematita, muscovita y anatasa, que son de alta dureza.

## 12. RECOMENDACIONES

El presente estudio contempló algunos ensayos de caracterización. Es importante recalcar que estos no fueron los suficientes para encontrar las curvas de degradación del módulo  $G$  y menos para encontrar una función de amortiguamiento cercana a la realidad. Se recomienda entonces para continuar o completar este trabajo realizar ensayos de columna resonante, a fin de conocer completamente la gama de valores de  $G$  y de deformación angular para poder definir una mejor función de los mismos.

Una propuesta de mejora para este trabajo consiste en realizar todos estos ensayos en condiciones variadas de humedad y de presión de confinamiento.

Se recomienda a la universidad mejorar sus equipos de ultrasonido y adquirir prontamente el equipo de Triaxial dinámico y de columna resonante.

## BIBLIOGRAFIA

ALFARO CASTILLO, Andrés José, Introducción a la ingeniería sismológica, Primera edición. Bogotá: Universidad de la Salle, 2009 ISBN 978-958-8572-08-6

ALFARO CASTILLO, Andrés José BOHORQUEZ FIERRO Mónica Andrea, Probabilistic and pseudo-deterministic seismic hazard assessment for Neiva Colombia En Bulletin of ISEE, 45, 139-146, 2011

ALFONSO F. J. Y SUAREZ DEL RIO L. M. Velocidad de propagación de ondas en rocas carbonatadas Trabajos de Geología Universidad de Oviedo ISSN 0474-9588 PAG. 15, 315-324

AREVALO Y ALFARO, Contenidos Frecuenciales de Sismos Colombianos registrados en BOCO y SDV (1994-1996). Bogotá 2002, pg 2

ASTM American Society for Testing and Materials Standard test Methods for the Determination of the Modulus and damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial apparatus 1996

FRANCO Luis Enrique, BERMUDEZ María Luisa, MARTINEZ Samuel Enrique. Calculo del periodo fundamental del suelo como herramienta para la microzonificación sísmica: casos colombianos. En III coloquio sobre Microzonificación Sísmica Serie Técnica No. 1 2002

GONZALEZ Jorge SCHMITZ Michael, ECHEZUERIA Heriberto MALAVE Gustavo Una metodología para caracterizar perfiles geotécnico En coloquio sobre Microzonificación Sísmica Serie Técnica No. 1 2002

HUARACHI Jesús Uldarico Evaluación de la relación de Poisson para sismos superficiales, intermedios y profundos. En compendio de trabajos de investigación CDNG – Biblioteca Instituto Geográfico del Perú V-5 2004 p. 141-154

INGEOMINAS. Zonificación Sismogeotecnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Bogotá. 2001. Pag. 19

KRAHN John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An engineering methodology. 2004 P 71

KRAMER. Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. Editorial Prentice – Hall. 1996. Pag. 237

OJEDA Jacobo, ALVARADO Carlos, DIAZ Fernando Aspectos geotécnicos del subsuelo de la ciudad de Villavicencio (Meta, Colombia) En III coloquio sobre Microzonificación Sísmica Serie Técnica No. 1 2002

RIVAS PEREA Diana Dixa, Influencia de la microestructura en el comportamiento dinámico de los suelos residuales de esquistos en Sabaneta, Trabajo de grado Magister en Ingeniería Geotecnia Bogotá. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de ingeniería civil Programa de maestría en ingeniería geotecnia 2010 67p

SANTIBAÑEZ RODRIGUEZ, Daniel Humberto, Determinación del potencial del licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. Tesis de grado Ingeniero Constructor. Valdivia Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias de la ingeniería Escuela Ingeniería en construcción 2006 64p

SEMILLERO QUINBAYA Tasas de recurrencia sísmica en la zona central de los andes colombianos a partir de la completitud del catalogo hasta el año 2004 Universidad del Quindío seminario de investigación

TRIGO SALAS Tania Alejandra Influencia De La Amplificación Local De Las Ondas Sísmicas y La Interacción Suelo-Fundación En El Puente Marga-Marga, , Universidad de Chile, 2007. Pág. 12.

WALTHAM Tony. Foundation of engineering geology. Third Edition New York Tylor & Francis e-Library 2009 ISBN 13 978-0-415-46960-9

# **ANEXOS**

## ANEXO A: DATOS DE TRIAXIAL CICLICO.

Los datos completos de Triaxial se encuentran en la carpeta electronica ANEXO A

### LABORATORIO DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS ENSAYO TRIAXIAL CICLICO POR DEFORMACIÓN CONTROLADA NORMA ASTM 3999 (2011)

Fecha de ensayo: 2012/08/22

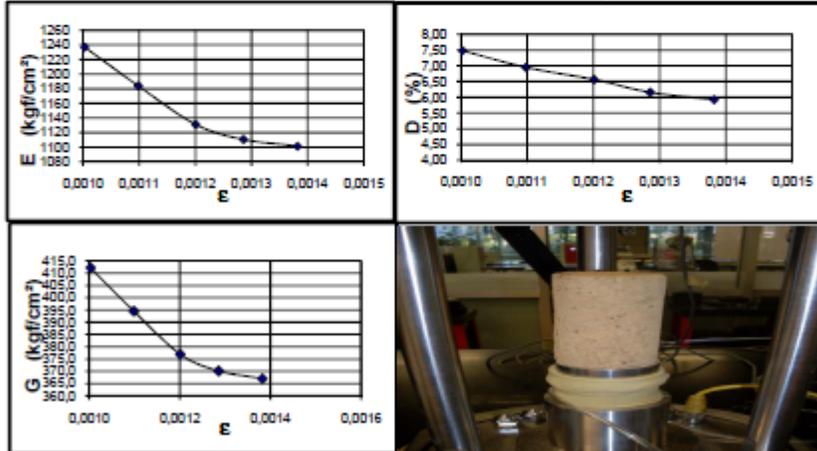
Perforación	Miembro	Muestra: Limos rojos	Profundidad:	-
Descripción Inicial:	Miembro Limos rojos	Localización:	Via Girón-Santander	

Datos iniciales de la muestra	Finales	(Metodo B)	Temp Ambiente 23°C	Humedad Relativa 68%
Díámetro (cm)	4,867	4,868	Limite liquido (%)	23,00
Altura (cm)	10,26	10,255	Limite plástico (%)	15,00
Area (cm <sup>2</sup> )	18,60	18,61	Índice de plasticidad	8,00
Volumen (cm <sup>3</sup> )	190,88	190,87	Pasante malta 200 (%)	40,64
Humedad (%)	1,7	1,7	Clasificación unificada	SC
Peso del suelo humedo (g)	319,8	319,8	<b>Datos de la prueba</b>	
Peso del suelo seco (g)	314,45	314,45	Presión de confinamiento efectiva (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,21
Masa unitaria húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	1,68	1,68	Presión de cámara (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,21
Masa unitaria seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,65	1,65	Presión Inducida (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,00
Gravedad específica	2,658	2,658	Frecuencia (Hz)	1,0
Relación de vacíos	0,61	0,61	Número de ciclos	40
Saturación (%)	7	7	Tiempo (segundos)	40

Resultados de la prueba: . Con aplicación de 40 ciclos, en condiciones naturales sin saturar, sin consolidar ; a solicitud del cliente.

Deformación por saturación (mm)	0,00	Cambio de Volumen por consolidación cm <sup>3</sup>	0,00
Parámetro B	---	Deformación por consolidación (mm)	0,00
		Altura de la muestra corregida (mm)	102,60
	ε	mm/mm	0,001003
	E	kgf/cm <sup>2</sup>	1236,6
	D	%	7,5
	G	kgf/cm <sup>2</sup>	412,2

E: Deformación unitaria promedio    E: Módulo elástico    D: Factor de amortiguamiento (%)    G: Módulo de rigidez



Equipo Utilizado:  
Triaxial Ciclico GCTS # 7711444 con Celda de carga serial 701386 Calibrado 2011/10/25  
Calibrador pie de Rey Mitutoyo SCP # 7 Calibrado 2012/01/18  
Balanza Mettler Toledo # 8142100 Calibrado 2011/08/25  
Horno de Secado Controls # 8110300 Calibrado 2012/05/23

Ejecutó: Jhon González    Calculó: Jhon González    Revisó: Vladimir Rodriguez

**LABORATORIO DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS**  
**ENSAYO TRIAXIAL CICLICO**  
**POR DEFORMACIÓN CONTROLADA NORMA ASTM 3999 (2011)**

Fecha de ensayo: **2012/08/17**

Perforación	Miembro	Muestra: Organos	Profundidad: -
Descripción Inicial:		Miembro Organos	Localización: Via Girón-Santander

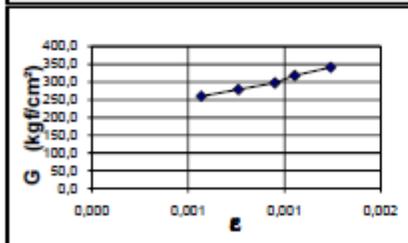
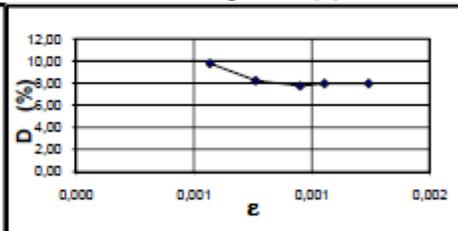
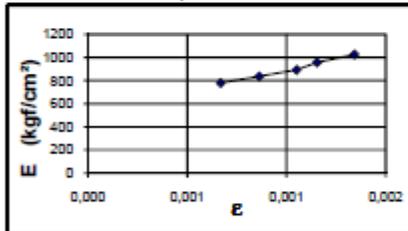
Datos iniciales de la muestra		Finales		(Metodo B)	Temp Ambiente 23°C	Humedad Relativa 68%
Diámetro (cm)	4,864	4,866	Limite líquido (%)	26,00		
Altura (cm)	10,73	10,610	Limite plástico (%)	16,00		
Area (cm <sup>2</sup> )	18,58	18,60	Índice de plasticidad	10,00		
Volumen (cm <sup>3</sup> )	199,40	197,31	Pasante malla 200 (%)	46,48		
Humedad (%)	3,44	3,44	Clasificación unificada	SC		
<b>Datos de la prueba</b>						
Peso del suelo humedo (g)	374,44	374,44	Presión de confinamiento efectiva (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,23		
Peso del suelo seco (g)	361,99	361,99	Presión de cámara (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,23		
Masa unitaria húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	1,88	1,90	Presión Inducida (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,00		
Masa unitaria seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,82	1,83	Frecuencia (Hz)	1,0		
Gravedad específica	2,664	2,664	Número de ciclos	40		
Relación de vacios	0,47	0,45	Tiempo (segundos)	40		
Saturación (%)	20	20				

Resultados de la prueba: . Con aplicación de 40 ciclos, en condiciones naturales sin saturar, sin consolidar ; a solicitud del cliente.

Deformación por saturación (mm)	0,00	Cambio de Volumen por consolidación cm <sup>3</sup>	0,00
Parámetro B	----	Deformación por consolidación (mm)	0,00
		Altura de la muestra corregida (mm)	107,31

	$\epsilon$	mm/mm	0,000668	0,000862	0,001050	0,001154	0,001341
E	kgf/cm <sup>2</sup>	779,7	836,5	892,3	955,5	1025,0	
D	%	9,8	8,2	7,7	8,0	8,0	
G	kgf/cm <sup>2</sup>	259,9	278,8	297,4	318,5	341,7	

E: Deformación unitaria promedio    E: Módulo elástico    D: Factor de amortiguamiento (%)    G: Módulo de rigidez



Equipo Utilizado:  
 Triaxial Ciclico GCTS # 7711444 con Celda de carga serial 701386 Calibrado 2011/10/25  
 Calibrador pie de Rey Mitutoyo SCP # 7 Calibrado 2012/01/18  
 Balanza Mettler Toledo # 8142100 Calibrado 2011/08/25  
 Horno de Secado Controls # 8110300 Calibrado 2012/05/23

Ejecutó: Jhon González    Calculó: Jhon González    Revisó: Vladimir Rodríguez

**LABORATORIO DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS**  
**ENSAYO TRIAXIAL CICLICO**  
**POR DEFORMACIÓN CONTROLADA NORMA ASTM 3999 (2011)**

Fecha de ensayo: 2012/08/17

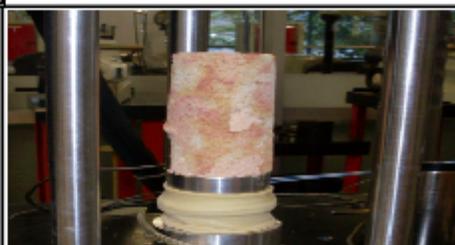
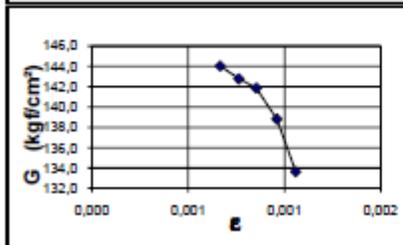
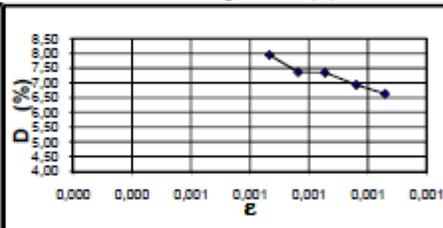
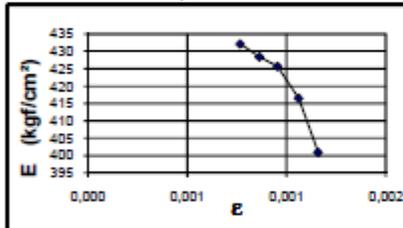
Perforación	Miembro	Muestra: Gravoso	Profundidad: -
Descripción Inicial:		Miembro Gravoso	Localización: Via Girón-Santander

Datos iniciales de la muestra		Finales	(Metodo B)	Temp Ambiente 23°C	Humedad Relativa 68%
Diámetro (cm)	4,974	4,978	Límite líquido (%)		41,00
Altura (cm)	10,66	10,646	Límite plástico (%)		20,00
Area (cm <sup>2</sup> )	19,43	19,46	Índice de plasticidad		20,00
Volumen (cm <sup>3</sup> )	207,14	207,20	Pasante malla 200 (%)		48,16
Humedad (%)	3,48	3,48	Clasificación unificada		SC
Peso del suelo húmedo (g)	367,52	367,52	<b>Datos de la prueba</b>		
Peso del suelo seco (g)	355,16	355,16	Presión de confinamiento efectiva (kgf/cm <sup>2</sup> )		0,21
Masa unitaria húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	1,77	1,77	Presión de cámara (kgf/cm <sup>2</sup> )		0,21
Masa unitaria seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,71	1,71	Presión Inducida (kgf/cm <sup>2</sup> )		0,00
Gravedad específica	2,646	2,646	Frecuencia (Hz)		1,0
Relación de vacíos	0,54	0,54	Número de ciclos		40
Saturación (%)	17	17	Tiempo (segundos)		40

Resultados de la prueba: . Con aplicación de 40 ciclos, en condiciones naturales sin saturar, sin consolidar ; a solicitud del cliente.

Deformación por saturación (mm)	0,00	Cambio de Volumen por consolidación cm <sup>3</sup>	0,00
Parámetro B	---	Deformación por consolidación (mm)	0,00
		Altura de la muestra corregida (mm)	106,60
$\epsilon$	mm/mm	0,000766	0,000863
E	kgf/cm <sup>2</sup>	432,1	428,4
D	%	7,9	7,4
G	kgf/cm <sup>2</sup>	144,0	142,8

E: Deformación unitaria promedio      E: Módulo elástico      D: Factor de amortiguamiento (%)      G: Módulo de rigidez



Equipo Utilizado:  
 Triaxial Ciclico GCTS # 7711444 con Celda de carga serial 701386 Calibrado 2011/10/25  
 Calibrador pie de Rey Mitutoyo SCP # 7 Calibrado 2012/01/18  
 Balanza Mettler Toledo # 8142100 Calibrado 2011/08/25  
 Homo de Secado Controls # 8110300 Calibrado 2012/05/23

Ejecutó: Jhon González      Calculó: Jhon González      Revisó: Vladimir Rodríguez

**LABORATORIO DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS**  
**ENSAYO TRIAXIAL CICLICO**  
**POR DEFORMACIÓN CONTROLADA NORMA ASTM 3999 (2011)**

Fecha de ensayo: 2012/08/21

Perforación	Miembro	Muestra: Finos	Profundidad: -
Descripción Inicial:		Miembro Finos	Localización: Vía Girón-Santander

Datos iniciales de la muestra		Finales	(Metodo B)	Temp Ambiente 23°C	Humedad Relativa 68%
Diámetro (cm)	4,905	4,890	Limite líquido (%)		24,00
Altura (cm)	10,80	10,783	Limite plástico (%)		11,00
Area (cm <sup>2</sup> )	18,90	18,78	Índice de plasticidad		14,00
Volumen (cm <sup>3</sup> )	204,00	202,51	Pasante malla 200 (%)		42,71
Humedad (%)	2,05	2,05	Clasificación unificada		SC
<b>Datos de la prueba</b>					
Peso del suelo humedo (g)	397,56	397,56	Presión de confinamiento efectiva (kgf/cm <sup>2</sup> )		0,53
Peso del suelo seco (g)	389,57	389,57	Presión de cámara (kgf/cm <sup>2</sup> )		0,53
Masa unitaria húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	1,95	1,96	Presión Inducida (kgf/cm <sup>2</sup> )		0,00
Masa unitaria seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,91	1,92	Frecuencia (Hz)		1,0
Gravedad específica	2,662	2,662	Número de ciclos		40
Relación de vacios	0,39	0,38	Tiempo (segundos)		40
Saturación (%)	14	14			

Resultados de la prueba: . Con aplicación de 40 ciclos, en condiciones naturales sin saturar, sin consolidar ; a solicitud del cliente.

Deformación por saturación (mm)	0,00	Cambio de Volumen por consolidación cm <sup>3</sup>	0,00
Parámetro B	---	Deformación por consolidación (mm)	0,00
		Altura de la muestra corregida (mm)	107,96

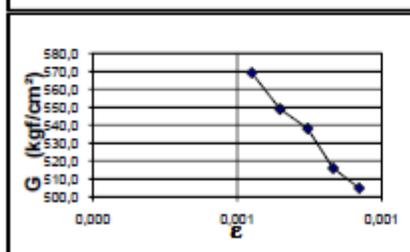
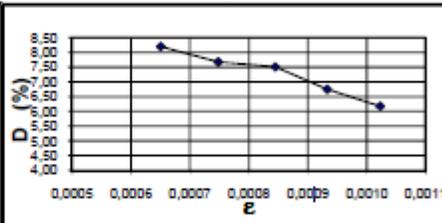
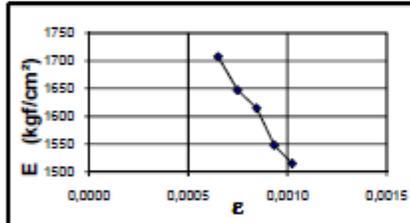
	ε	mm/mm	0,000650	0,000748	0,000845	0,000933	0,001023
E	kgf/cm <sup>2</sup>	1707,4	1647,1	1614,6	1548,2	1514,9	
D	%	8,2	7,7	7,5	6,8	6,2	
G	kgf/cm <sup>2</sup>	569,1	549,0	538,2	516,1	505,0	

ε: Deformación unitaria promedio

E: Módulo elástico

D: Factor de amortiguamiento (%)

G: Módulo de rigidez



Equipo Utilizado:

Triaxial Ciclico GCTS # 7711444 con Celda de carga serial 701386 Calibrado 2011/10/25

Calibrador pie de Rey Mitutoyo SCP # 7 Calibrado 2012/01/18

Balanza Mettler Toledo # 8142100 Calibrado 2011/08/25

Horno de Secado Controls # 8110300 Calibrado 2012/05/23

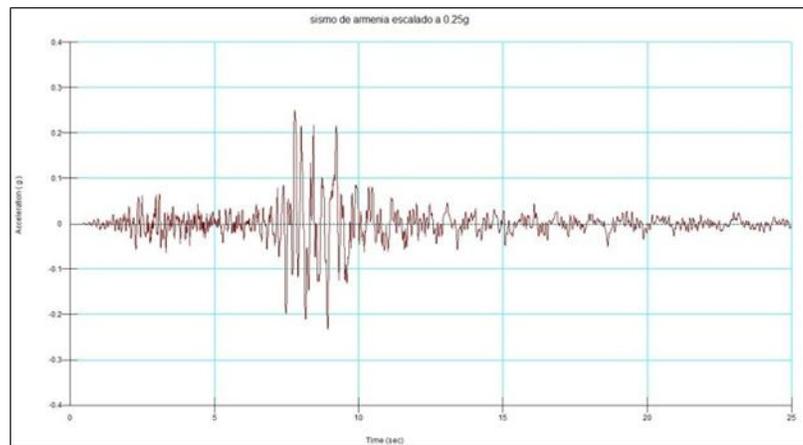
Ejecutó: Jhon González      Calculó: Jhon González      Revisó: Vladimir Rodríguez



## ANEXO B. SISMOS (DATOS DE ACELEROGRAMAS)

Los Datos completos de acelerogramas se encuentran en la carpeta electrónica, *ANEXO B*

### Acelerograma del sismo de Armenia



Fuente: Ingeominas

Los datos del sismo registrados por Ingeominas, son los siguientes.

#### INGEOMINAS RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS

Sismo del Quindío FECHA: 25-01-99

Epicentro: latitud= 4.410º norte longitud: -75.720º oeste profundidad: 0.0kms

Magnitud: 6.2

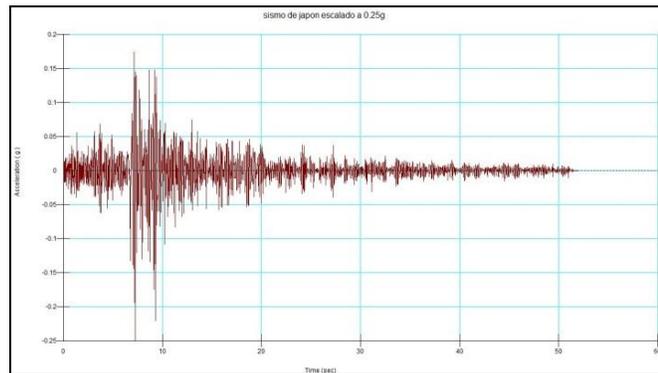
Estación de Pereira

Roca topografía: ondulada

Distancia hipocentral: 42 km

Componente 1 orientación e – w son 14001 muestras igualmente espaciadas por 0.005 segundos aceleración (cm/seg<sup>2</sup>)”

### Acelerograma del sismo de Japón.



Fuente: Autor

Magnitud MS= 6,2

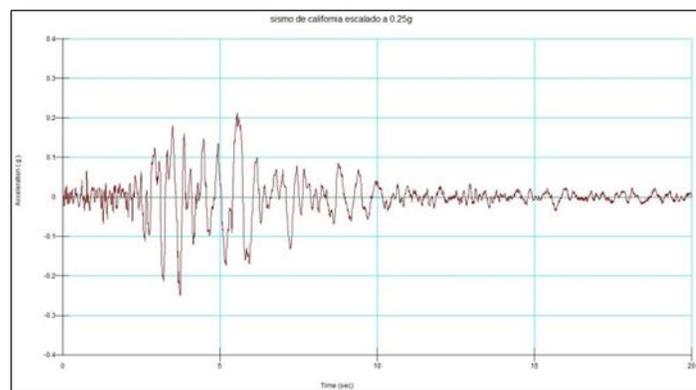
Fecha y Hora = 09-06-1976 20:35

Dirección de Acelerograma NS

Estación Longling Yunan

Datos tomados sobre roca

### Acelerograma del sismo de California



Fuente: Autor

Magnitud ML= 5,9

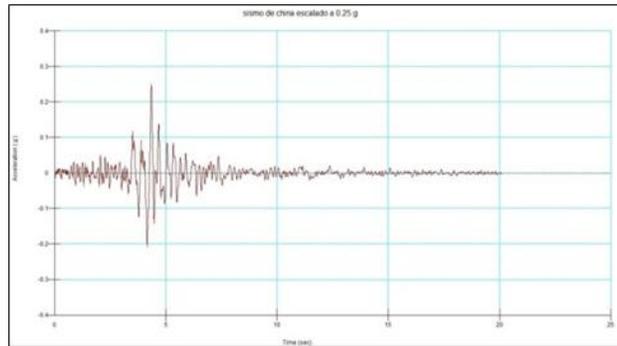
Fecha y Hora = 01-10-1987 14:42

Dirección de Acelerograma NS (360)

Caltech Seismic Station, Mount Wilson

Datos tomados sobre roca

## Acelerograma del sismo de China



Fuente: Autor

Magnitud M= 5,6

Fecha y Hora = 01-04-1970 23:23

Dirección de Acelerograma NS

Estación Miyako Harbor Works

Datos tomados sobre roca

## ANEXO C. ESTUDIO GEOELECTRICO

El estudio completo de Geoelectrica se encuentra en la carpeta electronica ANEXO C

### Resultados de la exploración Geoelectrica.

Profundidad (m) Desde - Hasta	Unidad Geoelectrica	Resistividad (Ohm – m)	Correlación Hidrogeológica
0.00 - 0.60	I	31	Material de relleno.
0.60 - 3.70	II	35	Depósito aluvial de arenas, gravas y lentes limosos. Fm Bucaramanga (Miembro Órganos).
3.70 - 15.80	III	51	Depósito aluvial de arenas, gravas y lentes areno-arcillosos. Húmedo a la base. Fm Bucaramanga (Miembro Órganos).
15.80 - 33.30	IV	579	Depósito aluvial de gravas, arenas y lentes areno-limosos. Fm Bucaramanga (Miembro Órganos).
33.30 - 138.50	V	261	Depósito aluvial de gravas, arenas y lentes areno-limosos. Con cierto grado de humedad. Fm Bucaramanga (Miembro Órganos).
138.50 - 177.80	VI	292	Basamento jurásico compuesto por arcillolitas y areniscas, fracturadas y húmedas.

Fuente: ESTUDIO GEOELECTRICO

## ANEXO D: REPORTE ORIGINAL DE QUAKE PARA EL ANÁLISIS LINEAL-ELÁSTICO Y LINEAL EQUIVALENTE

### Información del archivo

Creado por: [JAIRO GAMBOA](#)

Número de Revisión: [115](#)

Editado por: [JAIRO GAMBOA](#)

Fecha: [19/11/2012](#)

Hora: [11:30:17 am](#)

Nombre del archivo: [TESIS DE JAIRO EFECTOS DEL SITIO LINEAL ELASTICO.gsz](#)

Directorio: [C: \ GeoStudio 2007 \](#)

Fecha de la última Resuelto: [19/11/2012](#)

Última Hora Resuelto: [11:51:08 am](#)

### Configuración del proyecto

Largo (L) Unidades: [metros](#)

Tiempo (t) Unidades: [segundos](#)

Fuerza (F) Unidad: [kN](#)

Presión (p) Unidades: [kPa](#)

Unidades de Fuerza: [kPa](#)

Unidades Rigidez: [kPa](#)

Peso de la unidad de agua: [9,807 kN / m<sup>3</sup>](#)

Presión de aire: [101,33 kPa](#)

Vista: [2D](#)

### Configuración Análisis

#### Análisis Dinámico Armenia, Japón, China y California.

Descripción: [Trabajo de Aplicación, con sismo de Armenia, Japón, China y California](#)

Configuración

Esfuerzos iniciales: [Análisis de Padres](#)

PWP inicial: [Análisis de Padres](#)

Excluir los valores acumulativos: [Sí](#)

#### Controle

Coefficiente de esfuerzo cortante equivalente: [1](#)

Coefficiente de deformación de corte equivalente: [1](#)

Número Equivalente de ciclos: [10](#)

Licuefacción del límite del estrés: [0](#)

#### Convergencia

Número máximo de iteraciones: [10](#)

Desplazamiento Tolerancia Norma: [1%](#)

Equation Solver: [Paralelo directo](#)

RileyDamping: [3](#)

#### Tiempo (para el sismo de Armenia)

Hora de inicio: [0 seg](#)

Duración: [25 seg](#)

N ° de Pasos: [5000](#)

Guardar los pasos de cada: [50](#)

Pasos generados a través de registros sísmicos: [Sí](#)

## Materiales

### MIEMBRO RELLENO

Modelo: [Linear Elastic](#)

El esfuerzo deformación

Peso de la unidad: [16,5 kN / m<sup>3</sup>](#)

Relación de Poisson: [0,45](#)

Amortiguación Ratio: [0,01](#)

Módulo G: [38211 kPa](#)

### MIEMBRO gravoso

Modelo: [Linear Elastic](#)

El esfuerzo deformación

Peso de la unidad: [17,4 kN / m<sup>3</sup>](#)

Relación de Poisson: 0,45

Amortiguación Ratio: 0,01

Módulo G: 13614 kPa

## MIEMBRO FINOS

Modelo: Linear Elastic

El esfuerzo deformación

Peso de la unidad: 19,2 kN / m<sup>3</sup>

Relación de Poisson: 0,45

Amortiguación Ratio: 0,01

Módulo G: 52666 kPa

## MIEMBRO ORGANOS

Modelo: Linear Elastic

El esfuerzo deformación

Peso de la unidad: 18,6 kN / m<sup>3</sup>

Relación de Poisson: 0,45

Amortiguación Ratio: 0,01

Módulo G: 29496 kPa

## Condiciones de contorno

### Fijo X / Y

X: X-Desplazamiento 0

Y: Y-Desplazamiento 0

### Fijo Y

X: 0

Y: Y-Desplazamiento 0

## Información del archivo

Creado por: [JAIRO GAMBOA](#)

Número de Revisión: 103

Editado por: [JAIRO GAMBOA](#)

Fecha: [09/09/2012](#)

Hora: [10:52:16 am](#)

Nombre del archivo: [TESIS DE JAIRO EFECTOS DEL SITIO.gsz](#)

Directorio: [C: \ GeoStudio 2007 \](#)

Fecha de la última Resuelto: [09/09/2012](#)

Última Hora Resuelto: [01:08:44 pm](#)

## Configuración del proyecto

Largo (L) Unidades: [metros](#)

Tiempo (t) Unidades: [segundos](#)

Fuerza (F) Unidad: [kN](#)

Presión (p) Unidades: [kPa](#)

Unidades de Fuerza: [kPa](#)

Unidades Rigidez: [kPa](#)

Peso de la unidad de agua: [9,807 kN / m<sup>3</sup>](#)

Presión de aire: [101,33 kPa](#)

Vista: [2D](#)

## Configuración Análisis

### Dinámica analisis armenia

Descripción: [Trabajo de Aplicación, con sismo de Armenia, estación perealto roca](#)

Tipo: [QUAKE / W](#)

Padres: [Inicial Estática](#)

Método: [Equivalente Lineal Dinámico](#)

Configuración

Inicial del estrés: [Análisis de Padres](#)

PWP inicial: [Análisis de Padres](#)

Excluir los valores acumulativos: **Sí**

#### Controle

Coefficiente de esfuerzo cortante equivalente: **1**

Coefficiente de deformación de corte equivalente: **1**

Número Equivalente de ciclos: **10**

Licuefacción del límite del estrés: **0**

#### Convergencia

Número máximo de iteraciones: **10**

Desplazamiento Tolerancia Norma: **1%**

Equation Solver: **Paralelo directo**

RileyDamping: **3**

#### Tiempo

Hora de inicio: **0 seg**

Duración: **25 seg**

N ° de Pasos: **5000**

Guardar los pasos de cada: **50**

Pasos generados a través de registros sísmicos: **Sí**

## Materiales

### MIEMBRO RELLENO

Modelo: **Equivalente Lineal**

El estrés Strain

Peso de la unidad: **16,5 kN / m<sup>3</sup>**

Relación de Poisson: **0,49**

Dinámica G-Reducción de la función: **LIMOS g Reducción**

Función dinámica factor de amortiguamiento: **amortiguamiento LIMOS**

Módulo G: **443.000 kPa**

### MIEMBRO gravoso

Modelo: **Equivalente Lineal**

El estrés Strain

Peso de la unidad: **17,4 kN / m<sup>3</sup>**

Relación de Poisson: 0,49

Dinámica G-Reducción de la función: G REDUCCIÓN gravoso

Función dinámica factor de amortiguamiento: amortiguamiento gravoso

Módulo G: 180.000 kPa

## MIEMBRO FINOS

Modelo: [Equivalente Lineal](#)

El estrés Strain

Peso de la unidad: 19,2 kN / m<sup>3</sup>

Relación de Poisson: 0,49

Dinámica G-Reducción de la función: G FINOS DE REDUCCIÓN

Función dinámica factor de amortiguamiento: [amortiguamiento FINOS](#)

Módulo G: 606.750 kPa

## MIEMBRO ORGANOS

Modelo: [Equivalente Lineal](#)

El estrés Strain

Peso de la unidad: 18,6 kN / m<sup>3</sup>

Relación de Poisson: 0,49

Dinámica G-Reducción de la función: [ORGANOS DE REDUCCIÓN DE G](#)

Agua intersticial Función Presión: [PWP vs N / NL](#)

Cíclica Función: [número cíclico vs ARENAS SSR MEDIO SUELTAS](#)

Función dinámica factor de amortiguamiento: [amortiguamiento ORGANOS](#)

Módulo G: 463.000 kPa

## Condiciones de contorno

Fijo X / Y

X: [X-Desplazamiento 0](#)

Y: [Y-Desplazamiento 0](#)

Fijo Y

X: 0

Y: [Y-Desplazamiento 0](#)

## Registros del terremoto

Los registros horizontales del terremoto

Descripción: [sismo de Armenia escalado a 0,25 g](#)

Use Corrección de referencia: [No](#)

Modificado pico Acc.: [4.9997143](#)

Duración modificada: [1](#)